

Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra energetiky

Návrh regulačního výměníku tepla pro parní fluidní kotel o výkonu 20 MWt

Proposal Regulatory Heat Exchanger for Steam Fluidized Bed Boiler with and Output  
of 20 MWt

Student: Bc. Jaromír Kavan

Vedoucí diplomové práce: doc. Dr. Ing. Bohumír Čech

Ostrava 2017

## Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Jaromír Kavan**  
Studijní program: N2301 Strojní inženýrství  
Studijní obor: 2302T006 Energetické stroje a zařízení  
Téma: **Návrh regulačního výměníku tepla pro parní fluidní kotel o výkonu 20 MWt**  
**Proposal Regulatory Heat Exchanger for Steam Fluidized Bed Boiler with an Output of 20 MWt**  
Jazyk vypracování: čeština

### Zásady pro vypracování:

Vypracujte návrh regulačního výměníku tepla pro parní fluidní kotel o jmenovitém výkonu 20 MWt.

Diplomová práce bude obsahovat:

1. Přehled fluidních kotlů a způsoby regulace výkonu fluidních kotlů.
2. Základní bilanční výpočty paliva, vzduchu a spalín pro vybrané černé uhlí.
3. Schematický návrh teplosměnných ploch kotle včetně regulačního výměníku.
4. Výpočet jednotlivých teplosměnných ploch kotle.
5. Konstrukční návrh kotle.

Grafické práce:

1. Schéma teplosměnných ploch kotle.
2. Výkresová dokumentace kotle včetně regulačního výměníku.

### Seznam doporučené odborné literatury:

- [1] Černý V. a kol. Parní kotle a spalovací zařízení, SNTL Praha 1975.
- [2] Kolat P. Přenos tepla a hmoty, skripta VŠB Ostrava 1987.
- [3] ON 074017 Tepelný výpočet parních kotlů.
- [4] Dlouhý T. Výpočty kotlů a spalínových výměníků, skripta ČVUT Praha 2005.
- [5] Podklady a materiály katedry energetiky z měření fluidních kotlů.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **doc. Dr. Ing. Bohumír Čech**

Datum zadání: 09.12.2016

Datum odevzdání: 15.05.2017



doc. Ing. Kamil Kolarčík, CSc.  
vedoucí katedry



doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.  
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě 15.5.2017

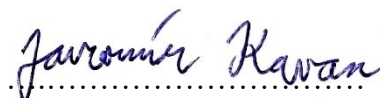
Handwritten signature of Jaromír Kavan in blue ink, written over a dotted line.

podpis

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- беру на ве́доміі, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že diplomová práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- беру на ве́доміі, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě 15.5.2017



podpis

Jméno a příjmení autora práce:

Bc. Jaromír Kavan

Adresa trvalého pobytu autora práce:

Modřínová 1462/6B

735 64 Havířov-Prostřední Suchá

## **Anotace diplomové práce**

KAVAN, J.: *Návrh regulačního výměníku tepla pro parní fluidní kotel o výkonu 20 MWt.* Ostrava: VŠB-TUO, Fakulta strojní, Katedra energetiky, 2017. 69 s.  
Vedoucí práce: Čech, B.

V diplomové práci jsou zpracovány základní teoretické informace o fluidním spalování. Návrh, výpočet a grafické zpracování parního fluidního kotle, včetně regulačního výměníku tepla.

**Klíčová slova:** parní, fluidní, kotel, výměník tepla, konstrukce, výpočet

## **Annotation of master thesis**

KAVAN, J.: *Proposal Regulatory Heat Exchanger for Steam Fluidized Bed Boiler with an Output of 20 MWt.* Ostrava: VSB-TUO, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Power Engineering, 2017. 69 p. Thesis head: Čech, B.

Basic theoretical informations about Fluidized Combustion are elaborated in the master thesis. Design, calculation and graphic processing of the Steam Fluidized Bed Boiler, including Regulatory Heat Exchanger.

**Key words:** Steam, Fluidized, Boiler, Heat Exchanger, Design, Calculation

## Obsah

Seznam použitých symbolů.....	- 9 -
1 Úvod.....	- 14 -
2 Fluidní spalování.....	- 15 -
2.1 Fluidizace.....	- 16 -
2.2 Výhody fluidního spalování.....	- 16 -
2.3 Nevýhody fluidního spalování.....	- 17 -
3 Rozdělení fluidních kotlů.....	- 18 -
3.1 Stacionární fluidní vrstva.....	- 18 -
3.1.1 S obsahem 2-5 % paliva .....	- 18 -
3.1.2 S obsahem 20 % paliva.....	- 18 -
3.1.3 Škvárující.....	- 19 -
3.2 Cirkulující fluidní vrstva.....	- 19 -
3.3 Expandující fluidní vrstva.....	- 19 -
4 Stechiometrie.....	- 20 -
4.1 Zadané palivo.....	- 20 -
4.1.1 Parametry paliva .....	- 20 -
4.2 Přepočet jednotlivých složek paliva na surový stav .....	- 20 -
4.3 Výhřevnost a množství paliva.....	- 21 -
4.4 Minimální objem vzduchu a spalin.....	- 22 -
4.5 Entalpie a I-t diagram vzduchu a spalin.....	- 25 -
5 Návrh parního fluidního kotle.....	- 28 -

5.1	Schémata kotle .....	- 28 -
5.2	Navržené a vypočtené parametry .....	- 29 -
6	Spalovací komora .....	- 31 -
6.1	Výpočet .....	- 31 -
6.2	Základní parametry .....	- 32 -
7	Cyklonový odlučovač popílku .....	- 34 -
7.1	Základní parametry .....	- 34 -
8	Fluidní uzavěr – regulační výměník tepla .....	- 35 -
8.1	Základní parametry .....	- 35 -
9	Návrh II. tahu .....	- 36 -
10	Ohřívák vzduchu .....	- 37 -
10.1	Základní parametry .....	- 37 -
10.2	Výpočet průtoků a rychlostí spalin a vzduchu .....	- 38 -
10.3	Výpočet přestupu tepla .....	- 40 -
11	Ohřívák vody .....	- 45 -
11.1	Základní parametry .....	- 45 -
11.2	Výpočet průtoků spalin .....	- 46 -
11.3	Výpočet přestupu tepla .....	- 47 -
12	Přehřívák 1 .....	- 51 -
12.1	Výpočet .....	- 51 -
12.2	Základní parametry .....	- 52 -
13	Přehřívák 2 .....	- 53 -

13.1	Základní parametry .....	- 53 -
13.2	Výpočet průtoků, rychlostí a součinitele přestupu tepla spalin a páry .....	- 54 -
13.3	Výpočet paralelní plochy .....	- 62 -
14	Kontrolní přepočet výkonu navrženého kotle .....	- 64 -
15	Závěr .....	- 65 -
	Poděkování .....	- 67 -
	Použitá literatura .....	- 68 -
	Seznam obrázků .....	- 69 -
	Seznam tabulek .....	- 69 -
	Seznam příloh.....	- 69 -



## Seznam použitých symbolů

Symbol	Význam	Jednotka
$A^r$	obsah popela v surovém stavu	
$C_d$	korekční součinitel na průměr trubek	
$C^{daf}$	obsah uhlíku v prchavé hořlavině	
$C_{fr}$	korekční součinitel na průměr popílkových částic	
$C^r$	obsah uhlíku v surovém stavu	
$C_s$	korekční součinitel na uspořádání svazku	
$C_z$	korekční součinitel na počet řad svazku	
$D$	vnější průměr trubek	[m]
$G_{sp}$	hmotnost spalín	[kg · kg <sup>-1</sup> ]
$H$	výška	[m]
$H^{daf}$	obsah vodíku v prchavé hořlavině	
$H^r$	obsah vodíku v surovém stavu	
$L$	délka trubky	[m]
$M_p$	množství vyrobené páry	[kg · s <sup>-1</sup> ]
$M_v$	množství vstřiku napájecí vody	[kg · s <sup>-1</sup> ]
$N^{daf}$	obsah dusíku v prchavé hořlavině	
$N^r$	obsah dusíku v surovém stavu	
$O^{daf}$	obsah kyslíku v prchavé hořlavině	
$O^r$	obsah kyslíku v surovém stavu	
$Pr$	Prandtlovo číslo	
$Q$	výkon	[W]
$Q_{i,red}$	redukováná výhřevnost paliva	[MJ · kg <sup>-1</sup> ]
$Q_i^r$	výhřevnost paliva v surovém stavu	[MJ · kg <sup>-1</sup> ]
$Q_k$	celkový výkon kotle	[MW <sub>t</sub> ]
$S$	plocha	[m <sup>2</sup> ]
$S^{daf}$	obsah síry v prchavé hořlavině	
$S^r$	obsah síry v surovém stavu	
$S_{roštu}$	plocha roštu	[m <sup>2</sup> ]
$V_{CO_2}$	objem CO <sub>2</sub> ve spalínách	[m <sub>N</sub> <sup>3</sup> · kg <sup>-1</sup> ]
$V_{N_2}$	objem N <sub>2</sub> ve spalínách	[m <sub>N</sub> <sup>3</sup> · kg <sup>-1</sup> ]

$V_{O_2,t}$	minimální objem kyslíku	$[m_N^3 \cdot kg^{-1}]$
$V_{SO_2}$	objem $SO_2$ ve spalinách	$[m_N^3 \cdot kg^{-1}]$
$V_{cycl.}$	objem cyklonového odlučovače	$[m^3]$
$V_{sp,H_2O}$	objem $H_2O$ v minimální objemu vlhkých spalin	$[m_N^3 \cdot kg^{-1}]$
$V_{sp,OVZ}^V$	skutečný průtok spalin ohřívákem vzduchu	$[m^3 \cdot s^{-1}]$
$V_{sp,t}^S$	minimální objem spalin	$[m_N^3 \cdot kg^{-1}]$
$V_{sp,t}^V$	minimální objem vlhkých spalin	$[m_N^3 \cdot kg^{-1}]$
$V_{sp}^V$	objem vlhkých spalin	$[m_N^3 \cdot kg^{-1}]$
$V_{stř,sp}^V$	střední objem vlhkých spalin	$[m_N^3 \cdot kg^{-1}]$
$V_{vz,H_2O}$	objem vodní páry ve vlhkém vzduchu	$[m_N^3 \cdot kg^{-1}]$
$V_{vz,OVZ}$	skutečný průtok vzduchu ohřívákem vzduchu	$[m^3 \cdot s^{-1}]$
$V_{vz,t}^S$	minimální objem suchého vzduchu	$[m_N^3 \cdot kg^{-1}]$
$V_{vz,t}^V$	minimální objem vlhkého vzduchu	$[m_N^3 \cdot kg^{-1}]$
$X_{\dot{u}}$	poměrný úlet popílku	
$\Delta p$	absolutní hodnota podtlaku	$[Pa]$
$\Delta t_{ln}$	střední logaritmický teplotní spád	$[K]$
$h^r$	obsah hořlaviny v surovém stavu	
$a$	šířka	$[m]$
$a_{sp}$	stupeň černosti spalin	
$a_{st}$	stupeň černosti povrchu stěn	
$b$	hloubka	$[m]$
$c_{pv}$	měrná tepelná kapacita tuhého paliva	$[kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}]$
$c_{su}$	měrná tepelná kapacita sušiny pro ČU	$[kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}]$
$d$	vnitřní průměr trubek	$[m]$
$d_{pk}$	střední efektivní průměr částic popílku	$[\mu m]$
$d_s$	střední průměr trubek	$[m]$
$i$	entalpie	$[kJ \cdot kg^{-1}]$
$i_{pv}$	fyzické teplo paliva	$[kJ \cdot kg^{-1}]$
$k$	součinitel prostupu tepla	$[W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}]$
$k_p$	součinitel zeslabení sálání popílkovými částicemi	

$k_s$	součinitel zeslabení sálání 3-atomovými plyny	
$kps$	optická hustota spalin	
$m_{pal}$	množství paliva	$[kg \cdot s^{-1}]$
$n$	součinitel přebytku spalovacího vzduchu	
$n_{tr}$	počet trubek	
$p$	tlak	$[Pa]$
$p_b$	barometrický tlak	$[Pa]$
$p_s$	parciální tlak 3-atomových plynů ve spalinách	$[Pa]$
$q_s$	průřezové tepelné zatížení	$[W \cdot m^{-2}]$
$r_{H_2O}$	objemová koncentrace vodní páry ve spalinách	
$r_{RO_2}$	objemová koncentrace CO <sub>2</sub> a SO <sub>2</sub> ve spalinách	
$r_s$	objemová koncentrace 3-atomových plynů ve spalinách	
$s$	efektivní tloušťka sálavé vrstvy	$[m]$
$s_1$	příčná rozteč trubek	$[m]$
$s_2$	podélná rozteč trubek	$[m]$
$s_{\dot{u}}$	úhlopříčná rozteč trubek	$[m]$
$t$	teplota	$[^{\circ}C]$
$t_{FU}$	tloušťka vyzdívky fluidního uzávěru	$[m]$
$t_b$	teplota páry na vstupu do bubnu	$[^{\circ}C]$
$t_{pv}$	teplota paliva	$[^{\circ}C]$
$t_{tr}$	tloušťka trubek	$[m]$
$t_z$	teplota povrchu nánosu na straně spalin	$[^{\circ}C]$
$w^r$	obsah vody v surovém stavu	
$w$	rychlost spalin	$[m \cdot s^{-1}]$
$z_1$	počet trubek v jedné řadě	
$z_2$	počet řad svazku	
$\Delta \varepsilon_z$	přirážka součinitele zanesení	$[m^2 \cdot K \cdot W^{-1}]$
$\varepsilon_z$	součinitel zanesení	$[m^2 \cdot K \cdot W^{-1}]$
$\varepsilon_{zo}$	základní hodnota součinitele zanesení	$[m^2 \cdot K \cdot W^{-1}]$
$\eta_k$	celková účinnost kotle	$[\%]$
$\mu_{sp}$	koncentrace popílku ve spalinách	$[kg \cdot kg^{-1}]$

$\sigma'_2$	poměrná úhlopříčná rozteč trubek	
$\sigma_1$	poměrná příčná rozteč trubek	
$\sigma_2$	poměrná podélná rozteč trubek	
$\chi_v$	součinitel zvětšení objemu suchého vzduchu	
$\alpha$	součinitel přebytku vzduchu	
$\alpha$	součinitel přestupu tepla	$[W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}]$
$\eta$	dynamická viskozita	$[Pa \cdot s^{-1}]$
$\lambda$	tepelná vodivost	$[W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}]$
$v$	měrný objem	$[m^3 \cdot kg^{-1}]$
$\xi$	opravný součinitel využití plochy ohříváku vzduchu	
$\nu$	kinematická viskozita	$[m^2 \cdot s^{-1}]$
$\psi$	korekce na křížový proud	
$\omega$	součinitel omývání plochy	

### Horní indexy

$S$	suché
$V$	vlhké
$daf$	prchavá hořlavina
$r$	surový stav

### Dolní indexy

$EKO$	ohřívák vody
$FU$	fluidní uzávěr
$NV$	napájecí voda
$OVZ$	ohřívák vzduchu
$PŘ1$	přehřívák 1
$PŘ2$	přehřívák 2
$SK$	spalovací komora
$b$	buben
$c$	celkový
$in$	vstup
$k$	konvekce

<i>out</i>	výstup
<i>p</i>	pára
<i>sal</i>	sálání
<i>sp</i>	spaliny
<i>stř</i>	vzduch
<i>t</i>	teoretický
<i>tr</i>	trubek
<i>vz</i>	vzduch
<i>w</i>	voda

# 1 Úvod

Energie je jedním z důležitých článků dnešní společnosti. Jelikož obnovitelné zdroje nejsou schopny generovat potřebné množství energie po dobu celého roku, musí být doplněny dalšími způsoby výroby, jako je například jádro nebo spalování fosilních paliv.

Největší zastoupení mají z mnoha důvodů fosilní paliva, přesněji se jedná o uhlí hnědé a černé. Při jejich spalování v elektrárenských a teplárenských provozech však vznikají emise mezi něž se řadí například oxidy síry, dusíku, oxidu uhelnatého nebo také tuhé znečišťující látky. Snahou energetického průmyslu je vyhovět nastaveným emisním limitům, proto je nutné neustále modernizovat výrobní zařízení.

Jednou z variant jak dosahovat nízkých koncentrací emisí ve spalinách je fluidní spalování. Velký rozmach výstavby těchto zařízení ve velké energetice zaznamenala Česká republika v letech 1996–1999 jako reakci na zpřísnění emisních limitů.

Cílem mé diplomové práce je navrhnout parní fluidní kotel o výkonu 20 MW<sub>t</sub>. Důležitou součástí je také výpočet teplosměnných ploch kotle a navržení koncepce fluidního uzávěru se zapojením regulačního výměníku. Abych mohl výpočty a konstrukční parametry lépe ověřit, vymodeluji celý kotel v grafickém systému CAD.

## 2 Fluidní spalování [1, 4, 7, 10, 13]

Jedná se o spalování nejrůznějších tuhých paliv ve fluidizovaném stavu, což je stav, při kterém nabývá směs plynu (většinou se jedná o vzduch) a pevné látky, vlastnosti kapaliny. Základem správného fluidního spalování je ideální poměr mezi tlakem vzduchu a velikostí zrna paliva. Se zvyšující se rychlostí vzduchu postupně narůstá míra turbulence ve fluidním loži.

Tento druh techniky se začal v energetické oblasti využívat v první polovině 20. století, ale do spalovacích zařízení se dostal o pár let později, a sice v sedmdesátých letech (v České republice ještě o pár let později – v druhé polovině 90. let). Rozšíření způsobu fluidního spalování bylo jakousi reakcí na vznikající přísné limity emisí, konkrétně oxidů síry (SOx) a oxidů dusíku (NOx). Jednalo se o jediný způsob, jakým bylo možné dosáhnout požadovaných hodnot, aniž by bylo nutné provádět sekundární čištění spalin. Ve fluidním loži však musí být splněna řada podmínek. Jednou z nich je udržet teplotu v optimální hodnotě 850 °C, což vede k nižší produkci oxidů dusíku. Navíc je tato teplota ideální pro reakci síry s vápencem, často využívaným k odsiřování, a v neposlední řadě také nedochází ke spékání vrstvy. Dalším předpokladem pro správnou funkci tohoto způsobu spalování je potřeba kontinuálního přísunu paliva.

Paliv, která se ve fluidních kotlích mohou spalovat je celá řada. Ať už se jedná o uhlí černé, hnědé, palivové směsi, případně paliva s vyšším obsahem popeloviny nebo síry. Není výjimkou i možnost kombinace primárních druhů paliv v kombinaci s biopalivy. Je-li kotel navržen s využitím vhodné technologie, může vlivem vysoké účinnosti dosahovat ztráty fyzickým teplem tuhých zbytků pod 1 %.

Tuhé částice mohou být ve třech základních stavech:

- klid – vrstva je nehybná a jedná se tedy o spalování na roštu
- kmitavý pohyb – fluidní vrstva se nachází na prahu fluidizace
- vířivý kmitavý pohyb – fluidní vrstva

## 2.1 Fluidizace

Do spalovací komory je přiváděn vzduch, který v počáteční fázi prostupuje skrze palivo pevně posazené na roštu a není tedy patrné narušení lože. Zvyšováním proudění vzduchu postupně začíná náběh fluidizace a lože se začíná chovat jako volně tekoucí kapalina. V tomto okamžiku ještě nedochází k výraznému vířivému kmitavému pohybu paliva. S postupným přibýváním vzduchu přestává lože držet při sobě a dochází k rozšiřování vrstvy. K tomuto jevu dochází, jelikož se uvnitř lože začínají vytvářet jakési bubliny vzduchu – jedná se tedy o stacionární (bublinkující) fluidní vrstvu.

Jelikož množství vzduchu se stále zvětšuje, bubliny se spojují a jejich objem narůstá stejně jako velikost vrstvy. Větší částice paliva se propadávají směrem dolů a menší částičky postupně víří nahoru. Celý prostor spalovací komory se začíná vyplňovat lehkým oblakem prachu – tato fáze se nazývá turbulentní. Pevnější částice paliva se drží stále ve fluidním loži. Rychlost skluzu se plynule zvyšuje při přechodu z bublinkující na turbulentní fázi a její hodnota nabývá rozdílu průměrných rychlostí paliva a vzduchu. Když se turbulentní úsek dostává do finální fáze začnou lože opouštět pevné částice a nabývají větší rychlost. Zvyšováním toku paliva stoupá oblak pevných částic a postupně se slučuje s oblakem prachu, což vede ke stálé expanzi objemu vrstvy. Takto by se dal popsat postupný vznik fluidní vrstvy ve spalovací komoře.

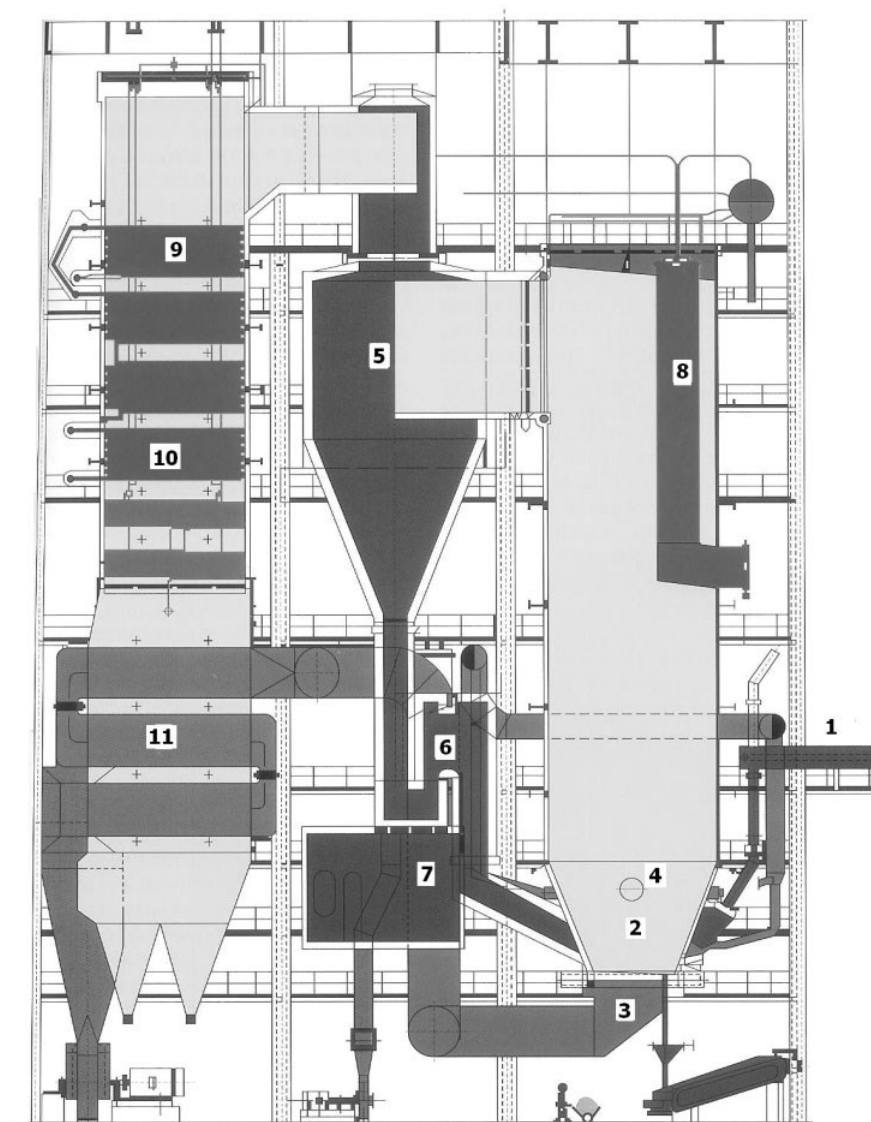
## 2.2 Výhody fluidního spalování

- schopnost spalovat téměř jakékoliv palivo
- možnost kombinovat více paliv najednou
- vysoká účinnost spalování
- velmi účinná a ekonomicky výhodná aplikace odsíření
- nízká tvorba oxidů dusíku
- nedochází ke spékání a znečišťování trubek
- rychlé najíždění kotle
- velký regulační rozsah kotle
- malá plocha roštu vlivem vyššího zatížení
- nižší komínová ztráta



## 2.3 Nevýhody fluidního spalování

- při spalování biopaliv je lepší přidat podpůrné palivo
- nutnost vysokého výkonu vzduchového ventilátoru
- v části spalovací komory musí být vyzdívka
- větší závislost na vlastnostech a granulometrii paliva
- potřeba velké teplosměnné plochy výparníku
- spotřebuje se více aditiva než u jiných metod odsíření



Obrázek č. 2.1: Parní fluidní kotel s cirkulující fluidní vrstvou [13]

1 – přívod paliva, 2 – fluidní vrstva, 3 – primární vzduch, 4 – sekundární vzduch, 5 – cyklon, 6 – fluidní uzávěr (sifon), 7 – externí chladič popela, 8 a 9 – přehřívák, 10 – ekonomizér, 11 – LUVO

### **3 Rozdělení fluidních kotlů [4, 7, 10, 13]**

Fluidní kotle je možné rozdělit na tři základní skupiny podle jejich fluidní vrstvy.

#### **3.1 Stacionární fluidní vrstva**

Tento typ kotlů je charakterizován nižšími rychlostmi fluidizace, větší granulometrií a jejich fluidní vrstva má zřetelné ohraničení. Nejčastěji se využívají při spalování biomasy a paliv nižší jakosti. Spalovací komora bývá v rovnoměrném provedení nebo se postupně rozšiřuje. Vstup paliva bývá situován nad fluidní vrstvu, která je složena obvykle z paliva, inertního materiálu a případného aditiva.

Nevýhody tohoto provedení:

- značný úlet částic z fluidní vrstvy
- větší hodnota mechanického nedopalu
- větší hodnota chemického nedopalu
- regulace teploty a výkonu je komplikovaná a nespolehlivá

##### **3.1.1 S obsahem 2-5 % paliva**

Jedním z možných provedení kotle se stacionární fluidní vrstvou je varianta složena ze 2 až 5 % paliva a 95 až 98 % inertních částic. Její teplota se pohybuje od 850 °C do 900 °C a nesmí v ní docházet k narušení povrchu částic tavením. Spalování je nejčastěji realizováno za působení přebytku spalovacího vzduchu. Spalitelné částice se následně vrací zpět do spalovací komory. Nejčastější provedení je s výparníkem uvnitř fluidní vrstvy, což zajišťuje regulaci teploty a neškvárování.

##### **3.1.2 S obsahem 20 % paliva**

Zde je složení fluidní vrstvy z 20 % paliva a 80 % inertních částic. Průběh spalování se uskutečňuje při nedostatku vzduchu a tím dochází k regulaci teploty. Částice ke spálení jsou navraceny do spalovací komory.

### **3.1.3 Škvárující**

Třetí možností je tzv. škvárující fluidní vrstva utvořena z palivových částic o hrubosti zrna maximálně 20 mm ve speciálním jednostupňovém fluidním ohništi. Teplota se pohybuje v rozmezí 1200–1300 °C a regulace probíhá pomocí množství přebytku primárního vzduchu. Sekundární vzduch je přiváděn nad fluidní lože, kde dohořívají zbylé částice. Spečence jsou za pomoci pásového roštu odváděny z fluidní vrstvy.

## **3.2 Cirkulující fluidní vrstva**

Spalování probíhá opačně jako u stacionární fluidní vrstvy. Rychlost je tedy vyšší a granulometrie naopak nižší. Cirkulující vrstva má větší koncentraci v ohništi. Může v ní být spalována široká škála paliv. Nejčastěji se využívá konstrukce spalovací komory s rozšířením ve spodní části a na výstupu jsou spaliny vedeny tangenciálně do cyklonového odlučovače popelových částic, které se vrací zpět do fluidní vrstvy. Vstup paliva je nejčastěji proveden nad fluidní vrstvu. Okysličením procesu hoření bývá primárním i sekundárním vzduchem. Důležitou podmínkou je nastavení obou vzduchů v závislosti na hrubosti zrna paliva.

## **3.3 Expandující fluidní vrstva**

Expandující fluidní vrstvou se rozumí kotle typu Duklafluid. Částice tuhé fáze cirkulují v rozšiřující se spalovací komoře, která musí být vyzděna žárobetonem. Zplyňovací reaktor je umístěn ve spodní části spalovací komory a jsou do něj navraceny částice, které uletí ven z ohniště.

## 4 Stechiometrie [1, 3, 4, 5, 6]

Tato kapitola obsahuje základní bilanční výpočty paliva, výpočty potřebného objemu vzduchu pro spálení jednotkového množství paliva, dále také výpočet objemu spalin vzniklých spálením tohoto paliva.

### 4.1 Zadané palivo

Jako palivo jsem zvolil černé uhlí upravené jako praná energetická směs, která se používá ve velkých energetických zařízeních. Uhlí pochází z dolu ČSA od akciové společnosti OKD.

#### 4.1.1 Parametry paliva

Obsah vody v surovém stavu	$w^r$	= 0,07
Obsah popela v surovém stavu	$A^r$	= 0,16
Obsah hořlaviny v surovém stavu	$h^r$	= 0,77
Obsah uhlíku v prchavé hořlavině	$C^{daf}$	= 0,8484
Obsah vodíku v prchavé hořlavině	$H^{daf}$	= 0,0516
Obsah síry v prchavé hořlavině	$S^{daf}$	= 0,0074
Obsah dusíku v prchavé hořlavině	$N^{daf}$	= 0,0115
Obsah kyslíku v prchavé hořlavině	$O^{daf}$	= 0,0811

### 4.2 Přepočet jednotlivých složek paliva na surový stav

Pro další výpočty je zapotřebí přepočítat prvkové složení paliva ze stavu hořlaviny, tedy bez vody a popela na původní surový stav.

Obsah uhlíku

$$C^r = C^{daf} \cdot (1 - A^r - w^r) \quad (4.1)$$

$$C^r = 0,8484 \cdot (1 - 0,16 - 0,07)$$

$$C^r = \mathbf{0,6533}$$

Obsah vodíku

$$H^r = H^{daf} \cdot (1 - A^r - w^r) \quad (4.2)$$

$$H^r = 0,0516 \cdot (1 - 0,16 - 0,07)$$

$$H^r = \mathbf{0,0397}$$

Obsah síry

$$S^r = S^{daf} \cdot (1 - A^r - w^r) \quad (4.3)$$

$$S^r = 0,00074 \cdot (1 - 0,16 - 0,07)$$

$$S^r = \mathbf{0,0057}$$

Obsah dusíku

$$N^r = N^{daf} \cdot (1 - A^r - w^r) \quad (4.4)$$

$$N^r = 0,0115 \cdot (1 - 0,16 - 0,07)$$

$$N^r = \mathbf{0,0089}$$

Obsah kyslíku

$$O^r = O^{daf} \cdot (1 - A^r - w^r) \quad (4.5)$$

$$O^r = 0,0811 \cdot (1 - 0,16 - 0,07)$$

$$O^r = \mathbf{0,0624}$$

Kontrolní přepočet paliva

$$1 = w^r + A^r + C^r + H^r + S^r + N^r + O^r \quad (4.6)$$

$$1 = 0,07 + 0,16 + 0,6533 + 0,0397 + 0,0057 + 0,0089 + 0,0624$$

$$1 = \mathbf{1}$$

### 4.3 Výhřevnost a množství paliva

Výhřevnost paliva

$$Q_i^r = 33,91 \cdot C^r + 121,42 \cdot H^r + 10,47 \cdot S^r - 11,26 \cdot O^r - 2,45 \cdot w^r \quad (4.7)$$

$$Q_i^r = 33,91 \cdot 0,6533 + 121,42 \cdot 0,0397 + 10,47 \cdot 0,0057 - 11,26 \cdot 0,0624 - 2,45 \cdot 0,07$$

$$Q_i^r = \mathbf{26,1616 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1}}$$

Měrná tepelná kapacita tuhého paliva

$$c_{pv} = 4,19 \cdot w^r + c_{su} \cdot (1 - w^r) \quad (4.8)$$

$$c_{pv} = 4,19 \cdot 0,07 + 1 \cdot (1 - 0,07)$$

$$c_{pv} = \mathbf{1,2233 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}}$$

$c_{su}$  ... měrná tepelná kapacita sušiny pro ČU

$[\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}]$

Fyzické teplo paliva

$$i_{pv} = c_{pv} \cdot t_{pv} \quad (4.9)$$

$$i_{pv} = 1,2233 \cdot 20$$

$$i_{pv} = \mathbf{24,466 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}}$$

$$t_{pv} \dots \text{teplota paliva} \quad [^{\circ}\text{C}]$$

Redukovaná výhřevnost paliva

$$Q_{i,red} = Q_i^r + i_{pv} \quad (4.10)$$

$$Q_{i,red} = 26,1616 + \frac{24,466}{1000}$$

$$Q_{i,red} = \mathbf{26,186 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1}}$$

#### 4.4 Minimální objem vzduchu a spalin

Minimální objem kyslíku pro dokonalé spálení 1 kg paliva

$$V_{O_2,t} = \frac{22,39}{12,01} \cdot C^r + \frac{22,39}{4,032} \cdot H^r + \frac{22,39}{32,06} \cdot S^r - \frac{22,39}{32} \cdot O^r \quad (4.11)$$

$$V_{O_2,t} = \frac{22,39}{12,01} \cdot 0,6533 + \frac{22,39}{4,032} \cdot 0,0397 + \frac{22,39}{32,06} \cdot 0,0057 - \frac{22,39}{32} \cdot 0,0624$$

$$V_{O_2,t} = \mathbf{1,3988 \text{ m}_N^3 \cdot \text{kg}^{-1}}$$

Minimální objem suchého vzduchu pro dokonalé spálení 1 kg paliva

$$V_{vz,t}^S = \frac{V_{O_2,t}}{0,21} \quad (4.12)$$

$$V_{vz,t}^S = \frac{1,3988}{0,21}$$

$$V_{vz,t}^S = \mathbf{6,6609 \text{ m}_N^3 \cdot \text{kg}^{-1}}$$

Minimální objem vlhkého vzduchu pro dokonalé spálení 1 kg paliva

$$V_{vz,t}^V = \chi_v \cdot V_{vz,t}^S \quad (4.13)$$

$$V_{vz,t}^V = 1,016 \cdot 6,6609$$

$$V_{vz,t}^V = \mathbf{6,7675 \text{ m}_N^3 \cdot \text{kg}^{-1}}$$

$\chi_v \dots$  součinitel zvětšení objemu suchého vzduchu

Objem vodní páry ve vlhkém vzduchu

$$V_{vz,H_2O} = V_{vz,t}^V - V_{vz,t}^S \quad (4.14)$$

$$V_{vz,H_2O} = 6,7675 - 6,6609$$

$$V_{vz,H_2O} = \mathbf{0,1066 \, m_N^3 \cdot kg^{-1}}$$

Objem CO<sub>2</sub> ve spalínách

$$V_{CO_2} = \frac{22,26}{12,01} \cdot C^r + 0,0003 \cdot V_{vz,t}^S \quad (4.15)$$

$$V_{CO_2} = \frac{22,26}{12,01} \cdot 0,6533 + 0,0003 \cdot 6,6609$$

$$V_{CO_2} = \mathbf{1,2128 \, m_N^3 \cdot kg^{-1}}$$

Objem SO<sub>2</sub> ve spalínách

$$V_{SO_2} = \frac{21,89}{32,06} \cdot S^r \quad (4.16)$$

$$V_{SO_2} = \frac{21,89}{32,06} \cdot 0,0057$$

$$V_{SO_2} = \mathbf{0,0039 \, m_N^3 \cdot kg^{-1}}$$

Objem N<sub>2</sub> ve spalínách

$$V_{N_2} = \frac{22,4}{28,016} \cdot N^r + 0,7897 \cdot V_{vz,t}^S \quad (4.17)$$

$$V_{N_2} = \frac{22,4}{28,016} \cdot 0,0089 + 0,7897 \cdot 6,6609$$

$$V_{N_2} = \mathbf{5,2672 \, m_N^3 \cdot kg^{-1}}$$

Minimální objem spalin při spálení 1 kg paliva

$$V_{sp,t}^S = V_{CO_2} + V_{SO_2} + V_{N_2} \quad (4.18)$$

$$V_{sp,t}^S = 1,2128 + 0,0039 + 5,2672$$

$$V_{sp,t}^S = \mathbf{6,4839 \, m_N^3 \cdot kg^{-1}}$$

Objem H<sub>2</sub>O v minimálním objemu vlhkých spalin

$$V_{sp,H_2O} = \frac{44,8}{4,032} \cdot H^r + \frac{22,4}{18,016} \cdot w^r + V_{vz,H_2O} \quad (4.19)$$

$$V_{sp,H_2O} = \frac{44,8}{4,032} \cdot 0,0397 + \frac{22,4}{18,016} \cdot 0,07 + 0,1066$$

$$V_{sp,H_2O} = \mathbf{0,6351 \, m_N^3 \cdot kg^{-1}}$$

Minimální objem vlhkých spalin

$$V_{sp,t}^V = V_{sp,t}^S + V_{sp,H_2O} \quad (4.20)$$

$$V_{sp,t}^V = 6,4839 + 0,6351$$

$$V_{sp,t}^V = \mathbf{7,119 \, m_N^3 \cdot kg^{-1}}$$

Objem spalin při spálení 1 kg paliva s přebytkem vzduchu větším než 1

$$V_{sp}^V = V_{sp,t}^V + (n - 1) \cdot V_{vz,t}^V \quad (4.21)$$

$$V_{sp}^V = 7,119 + (1,1 - 1) \cdot 6,7675$$

$$V_{sp}^V = \mathbf{7,7957 \, m_N^3 \cdot kg^{-1}}$$

*n ... součinitel přebytku spalovacího vzduchu*



## 4.5 Entalpie a I-t diagram vzduchu a spalin

Při výpočtech energetických zařízení je zapotřebí vyjádřit teplo odebírané spalinám. Jelikož se měrná tepelná kapacita výrazně liší s měnící se teplotou, je vhodnější variantou použití entalpie spalin.

Spaliny jsou směsí různých plynů. Ze stechiometrických výpočtů je zapotřebí získat objem každé složky spalin a následně ji vynásobit měrnou entalpií daného plynu dle tabulky č. 4.1. Jakmile máme dílčí entalpie plynů spočítány, stačí je pouze sečíst a získáme výsledné entalpie spalin za daných teplot.

Tabulka č. 4.1: Měrná entalpie některých složek spalin v závislosti na teplotě

t [°C]	CO <sub>2</sub>	SO <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	Ar	H <sub>2</sub> O	vzduch suchý	CO	O <sub>2</sub>	popílek [kJ·kg <sup>-1</sup> ]
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
25	41,62	46,81	32,53	23,32	39,10	32,57	32,49	32,78	20,20
100	170	191,2	129,5	93,07	150,6	132,3	132,3	131,7	80,4
200	357,5	394,1	259,9	186	304,5	266,2	261,4	267	170
300	558,8	610,4	392,1	278,8	462,8	402,5	395	406,8	264,6
400	771,9	836,5	526,7	371,7	625,9	541,7	531,7	550,9	361,6
500	994,4	1070	664	464,7	794,5	684,1	671,6	698,7	459,5
600	1225	1310	804,3	557,3	968,8	829,6	814,3	849,9	558
700	1462	1554	947,3	650,2	1149	978,1	960,4	1003	658,3
800	1705	1801	1093	743,1	1335	1129	1109	1159	760,8
900	1952	2052	1241	835,7	1526	1283	1260	1318	868,4
1000	2203	2304	1392	928,2	1723	1439	1413	1477	982,8

Podle vzorců pro výpočet entalpie stechiometrických spalin, entalpie minimálního množství vzduchu a entalpie spalin vzniklých spálením 1 kg ČU s přebytkem vzduchu jsem vypočítal potřebné chybějící hodnoty. Ty jsem následně vložil do tabulky č. 4.2, abych pomocí vypočtených dat vytvořil I-t diagram spalin a vzduchu – obrázek č. 4.1.

Entalpie stechiometrických spalin  $[kJ \cdot kg^{-1}]$

$$I_{Smin}^t = V_{CO_2} \cdot i_{CO_2}^t + V_{SO_2} \cdot i_{SO_2}^t + V_{N_2} \cdot i_{N_2}^t + V_{H_2O} \cdot i_{H_2O}^t + A^r \cdot i_{pop}^t \quad (4.22)$$

Entalpie minimálního množství vzduchu  $[kJ \cdot kg^{-1}]$

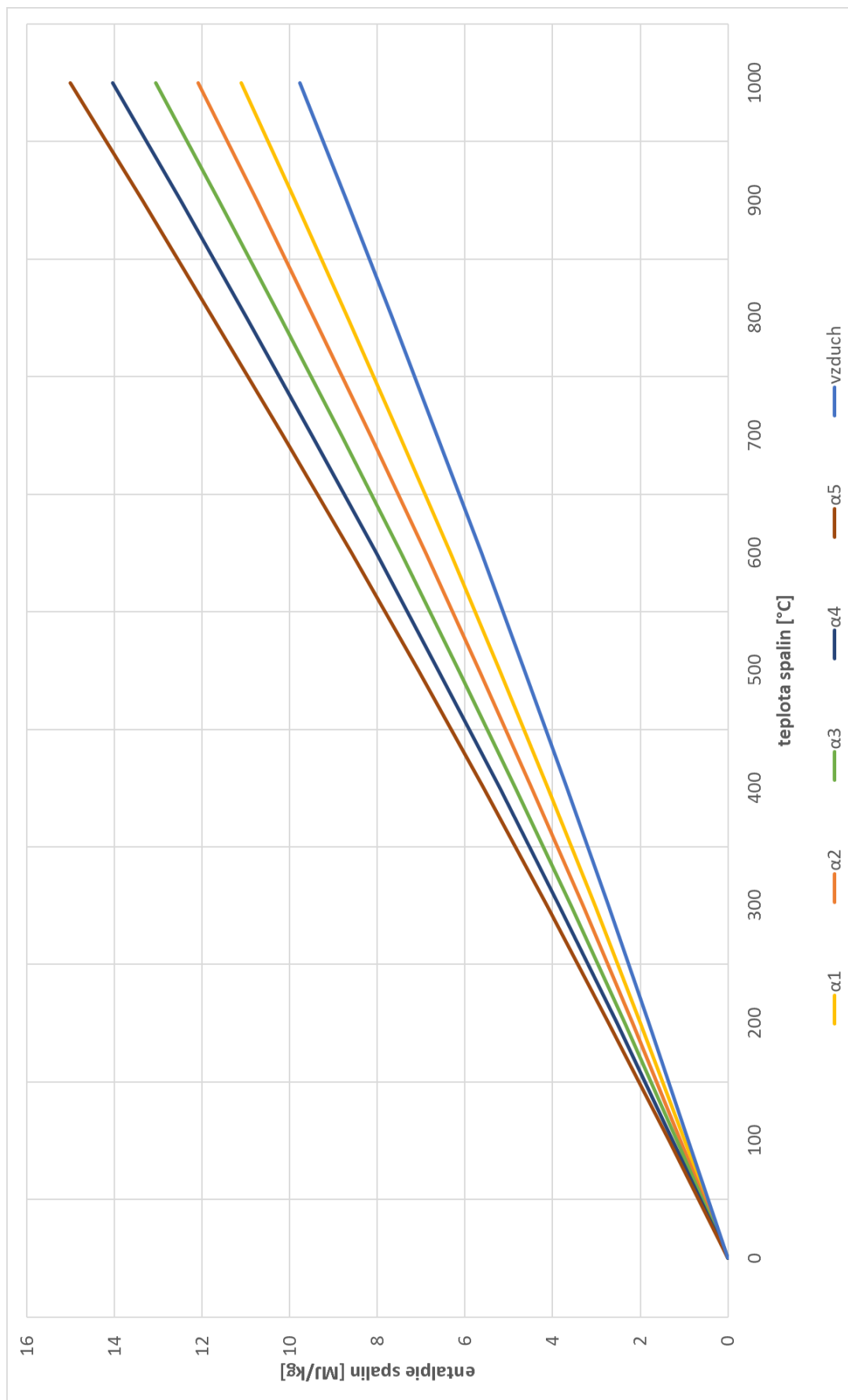
$$I_{Vmin}^t = V_{vz,t}^S \cdot i_{VS}^t + V_{vz,H_2O} \cdot i_{H_2O}^t \quad (4.23)$$

Entalpie spalin, vzniklých spálením 1 kg černého uhlí s přebytkem vzduchu a určité teplotě  $[kJ \cdot kg^{-1}]$

$$I_S^{t,\alpha} = I_{Smin}^t + (\alpha - 1) \cdot I_{Vmin}^t \quad (4.24)$$

Tabulka č. 4.2: Dopočtená tabulka spalin pro I-t diagram

t [°C]	$I_{Smin}^t$	$I_{Vmin}^t$	$I_S^{t,\alpha} = I_{Smin}^t + (\alpha - 1) \cdot I_{Vmin}^t$				
			$\alpha_1 = 1,0$	$\alpha_2 = 1,1$	$\alpha_3 = 1,2$	$\alpha_4 = 1,3$	$\alpha_5 = 1,4$
0	0	0	0	0	0	0	0
25	246,83	221,11	246,83	268,94	291,06	313,17	335,28
100	984,67	897,29	984,67	1074,40	1164,13	1253,85	1343,58
200	1997,44	1805,59	1997,44	2178,00	2358,56	2539,12	2719,68
300	3039,28	2730,35	3039,28	3312,31	3585,35	3858,38	4131,41
400	4111,15	3674,93	4111,15	4478,64	4846,14	5213,63	5581,12
500	5212,17	4641,42	5212,17	5676,31	6140,45	6604,60	7068,74
600	6342,46	5629,16	6342,46	6905,38	7468,29	8031,21	8594,12
700	7498,50	6637,51	7498,50	8162,25	8826,00	9489,75	10153,50
800	8679,73	7662,47	8679,73	9445,97	10212,22	10978,47	11744,71
900	9881,11	8708,61	9881,11	10751,97	11622,83	12493,69	13364,55
1000	11106,96	9768,71	11106,96	12083,83	13060,71	14037,58	15014,45



Obrázek č. 4.1: I-t diagram spalin pro černé uhlí

## 5 Návrh parního fluidního kotle [1, 3, 5, 6]

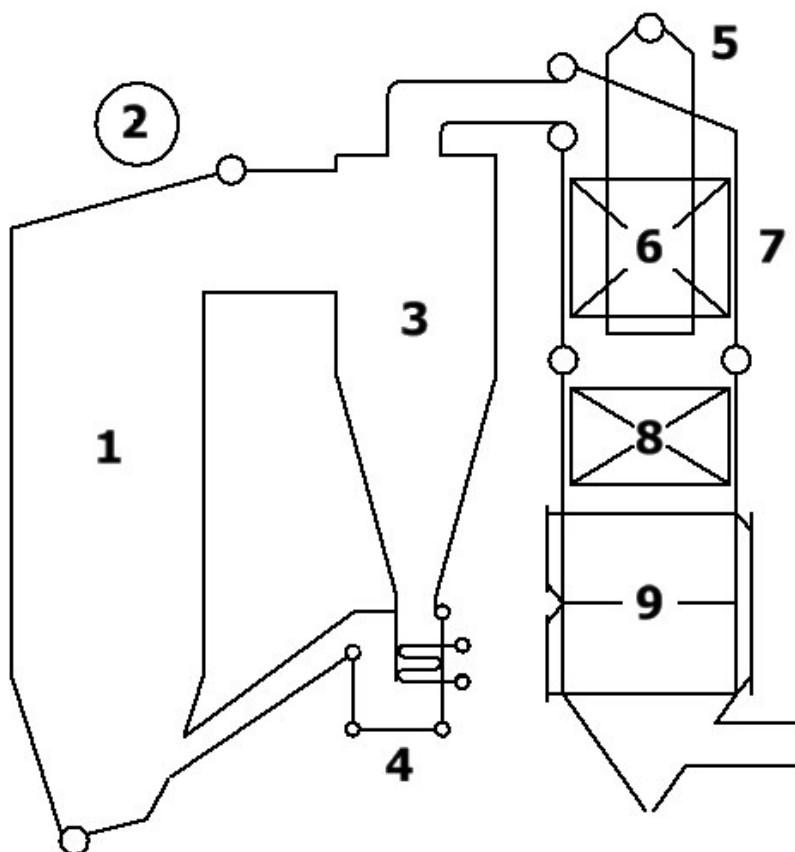
Tato kapitola se zabývá návrhem parního fluidního kotle o výkonu 20 MW<sub>t</sub>. V kotli bude spalována černouhelná energetická směs praná. Spalovací komora a horní část druhého tahu (přehřívák 1) je navržena z membránových stěn. První tah kotle je posazen na betonových patkách a dilatuje směrem nahoru. Cyklonový odlučovač, ze kterého se vrací popílek zpět do spalovací komory, je posazen na ocelové konstrukci kotle a dilatuje tedy směrem dolů. Druhý tah je zavěšen na konstrukci a dilatuje také směrem dolů. Na jeho konci se nachází otvor, z něhož vystupují spaliny směrem do komína. Zároveň je ve spodní části druhého tahu výsypka na popel, který se nepodařilo odloučit v cyklonu. Kvůli rozdílné dilataci prvního a druhého tahu jsou mezi těmito částmi kotle zabudovány kompenzátory.

### 5.1 Schémata kotle

Na obrázku 5.1 je předběžné schéma teplosměnných ploch navrhovaného parního fluidního kotle.

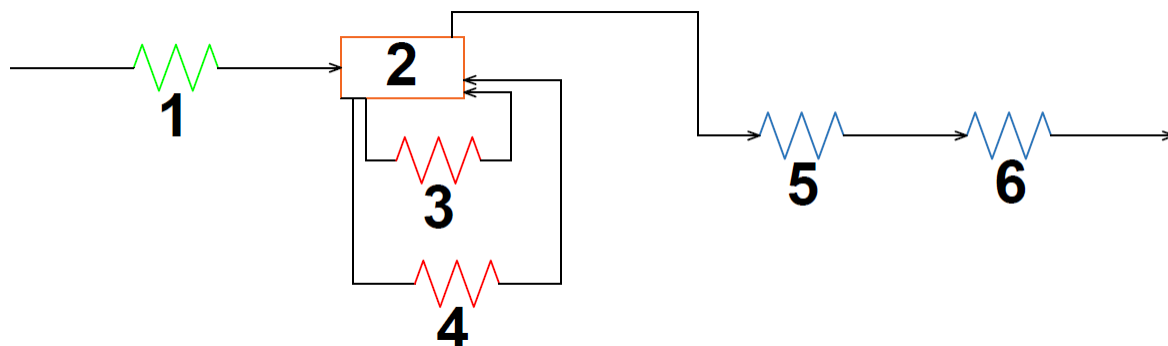
Popis obrázku:

1. Spalovací komora
2. Kotlové těleso
3. Cyklon
4. Fluidní uzávěr
5. Závěsy přehříváku 2
6. Přehřívák páry 2
7. Přehřívák páry 1
8. Ohřívač vody
9. Ohřívač vzduchu



Obrázek č. 5.1: Schéma výhřevných ploch navrhovaného kotle

Jelikož se jedná o parní kotel, je zapotřebí sestavit také schéma znázorňující postupné vypařování vody na sytou páru (obrázek 5.2). Z napájecí nádrže je voda čerpána do ekonomizéru. Proudí celým kotlovým systémem až do konvekčního přehříváku, ze kterého vystupuje o požadovaných jmenovitých parametrech na spotřebič.



Obrázek č. 5.2: Schéma voda–pára

Popis obrázku:

1. Ohřívač vody
2. Kotlové těleso
3. Fluidní uzávěr
4. Spalovací komora
5. Přehřívák páry 1
6. Přehřívák páry 2

## 5.2 Navržené a vypočtené parametry

Pro výpočet kotle je zapotřebí znát množství vstupujícího paliva, množství vyrobené páry a jelikož bude mít navrhovaný kotel regulaci teploty páry vstřikem napájecí vody za přehřívákem 1, je nutné znát i hodnotu této veličiny. Po konzultaci s vedoucím práce jsem stanovil účinnost kotle na 90 % a množství vstřikované vody na 5 % z celkového množství vyrobené páry.

Po konzultaci s vedoucím práce jsem zvolil následující parametry:

- teplota napájecí vody 155 °C
- jmenovitá teplota páry  $535 \pm 5$  °C, tlak 9,3 MPa
- teplota vzduchu na vstupu do ohřívačku vzduchu je 70 °C, na výstupu 200 °C
- teplota spalin ve spalovací komoře 850 °C, na výstupu z II. tahu teplota 130 °C

Množství paliva

$$m_{pal} = \frac{Q_k}{Q_i \cdot \eta_k} \quad (5.1)$$

$$m_{pal} = \frac{20000}{26,19 \cdot 0,9}$$

$$m_{pal} = \mathbf{0,85 \text{ kg} \cdot s^{-1}}$$

$Q_k$  ... celkový výkon kotle [MWt]

$\eta_k$  ... celková účinnost kotle [%]

Množství vyrobené páry

$$M_p = \frac{Q_k}{i_p - i_{NV}} \quad (5.2)$$

$$M_p = \frac{Q_k}{i_p - i_{NV}}$$

$$M_p = \mathbf{7,1 \text{ kg} \cdot s^{-1}}$$

$i_p$  ... entalpie jmenovité páry [kJ · kg<sup>-1</sup>]

$i_{NV}$  ... entalpie napájecí vody [kJ · kg<sup>-1</sup>]

Množství vstřiku napájecí vody

$$M_v = 0,05 \cdot M_p \quad (5.3)$$

$$M_v = 0,05 \cdot M_p$$

$$M_v = \mathbf{0,36 \text{ kg} \cdot s^{-1}}$$

## 6 Spalovací komora [1, 2, 3, 4, 5, 11, 12]

Spalovací komora se nachází v prvním tahu kotle. Je konstruována z membránových stěn, které jsou pevnostně dimenzovány tak, aby mohl kotel dilatovat směrem nahoru. Spalovací komora je posazena na betonových patkách a její výška je 24 m. Teplota spalin uvnitř spalovací komory se bude pohybovat okolo 850 °C.

Ve spodní části je přiváděn primární vzduch z ohříváku vzduchu, který prostupuje přes rošt do fluidní vrstvy. Pod roštem se nachází díra, na kterou je napojena trubka pro odvod popela. Ten je dále dopravován šnekovým dopravníkem do zásobníku popela. Membránové stěny jsou do výšky 8 m vyzděny žárobetnem. Přední stěna je osazena dvěma plynovými hořáky, z nichž každý má na obou stranách vstup sekundárního vzduchu. Na přední stěně se nachází otvor pro vstup paliva. Zadní stěna má otvor pro vstup do spalovací komory z fluidního uzávěru. Na levé stěně se nachází vlez. V horní části zadní stěny je výstup ze spalovací komory do cyklonu.

### 6.1 Výpočet

Na základě zhodnocení a přepočtení některých parametrů z jiných fluidní kotlů jsem po konzultaci s vedoucím práce zvolil součinitel prostupu tepla  $k = 81,83 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$  a průřezové tepelné zatížení roštu  $q_s = 10,16 \text{ MW} \cdot \text{m}^{-2}$ .

Logaritmický teplotní spád

$$\Delta t_{ln} = \frac{\Delta t' - \Delta t''}{\ln \frac{\Delta t'}{\Delta t''}} = \frac{(t_{sp,in} - t_b) - (t_{sp,out} - t_{w,in})}{\ln \frac{(t_{sp,in} - t_b)}{(t_{sp,out} - t_{w,in})}} \quad (6.1)$$

$$\Delta t_{ln} = \frac{(860 - 310) - (850 - 245)}{\ln \frac{(860 - 310)}{(850 - 245)}}$$

$$\Delta t_{ln} = 576,69 \text{ K}$$

$t_b$  ... teplota páry do bubnu [°C]

$t_{w,in}$  ... teplota vody do SK z EKO [°C]

Výkon spalovací komory

$$Q_{SK} = (M_p - M_v) \cdot (i_b - i_{w,in}) \quad (6.2)$$

$$Q_{SK} = (7,1 - 0,36) \cdot (2727,9 - 1061,5)$$

$$Q_{SK} = \mathbf{11231,54 \text{ kW}}$$

Teplosměnná plocha spalovací komory

$$S_{SK} = \frac{Q_{SK}}{k \cdot \Delta t_{ln}} \quad (6.3)$$

$$S_{SK} = \frac{11231,54 \cdot 1000}{81,83 \cdot 576,69}$$

$$S_{SK} = \mathbf{238 \text{ m}^2}$$

Plocha roštu

$$S_{roštu} = \frac{Q_k}{q_s} \quad (6.4)$$

$$S_{roštu} = \frac{20}{10,16}$$

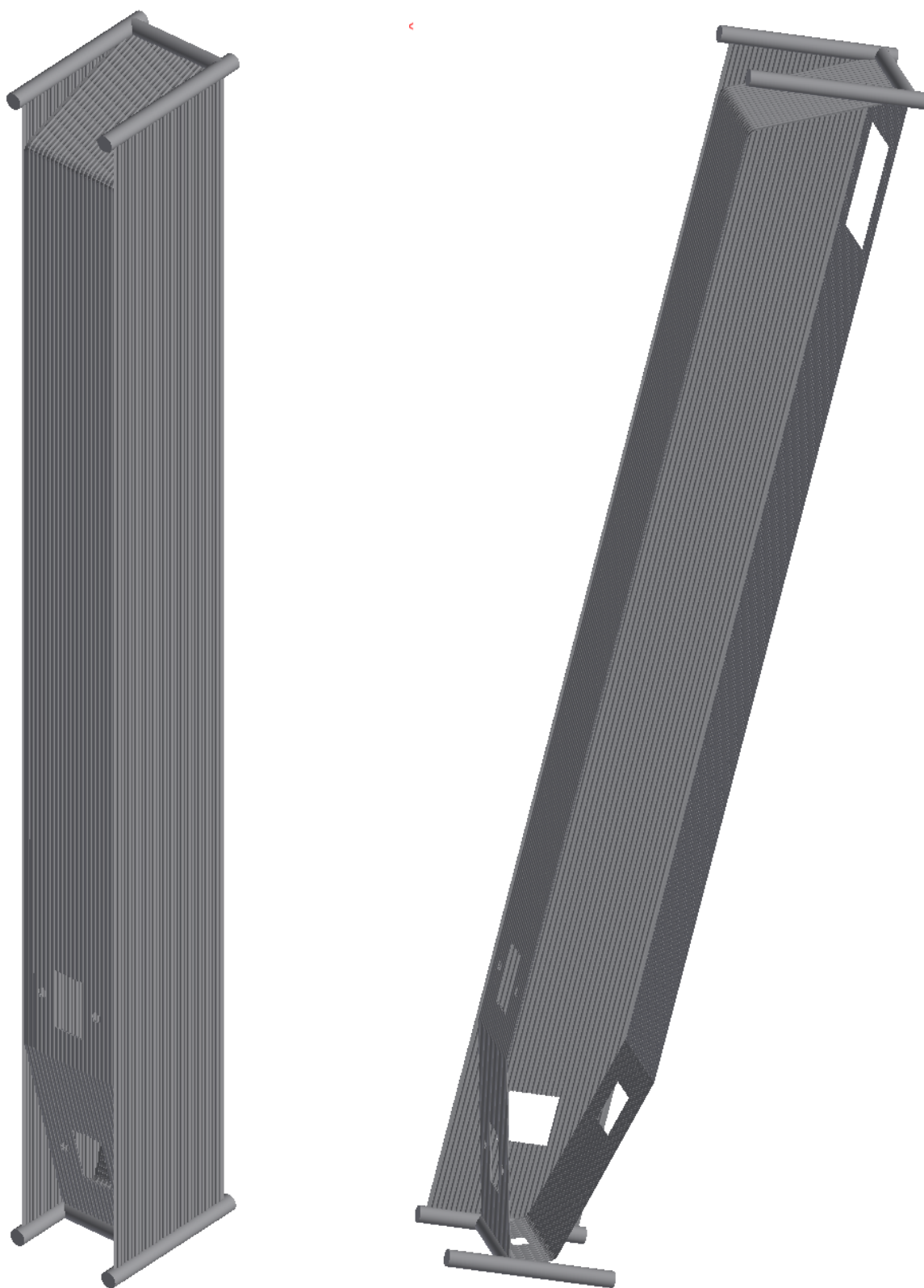
$$S_{roštu} = \mathbf{1,97 \text{ m}^2}$$

## 6.2 Základní parametry

- použité trubky pro membránové stěny jsou  $\varnothing 60,3 \times 8$ , materiál 16Mo3
- praporky membránových stěn PLO35x8, materiál 16Mo3
- komory  $\varnothing 323,9 \times 40$ , materiál 16Mo3

Šířka	$a$	= 2100	[mm]
Hloubka	$b$	= 2800	[mm]
Výška	$H$	= 24000	[mm]
Příčná rozteč trubek	$a_{rošt}$	= 2100	[mm]
Podélná rozteč trubek	$b_{rošt}$	= 950	[mm]





Obrázek č. 6.1 a 6.2: Spalovací komora

## 7 Cyklonový odlučovač popílků [1, 4, 12]

Cyklonový odlučovač se nachází hned za prvním tahem a je navržen jako odstředivý. Vstupují do něj přes kompenzátory tangenciálně spaliny otvorem v zadní stěně spalovací komory. Odloučený popel bude propadávat do fluidního uzávěru, ze kterého poputuje sesypem zpět do spalovací komory. V horní části je potrubí kruhového průřezu, které odvádí spaliny odloučené od popela s účinností 90 % směrem do druhého tahu.

Cyklon je postaven na patkách, nacházejících se po stranách pláště a připevněn ke konstrukci. Dilatuje tedy směrem dolů. Uvnitř je vyložen dvouvrstvou vyzdívkou z pružného žárobetonu o tloušťce 340 mm, která uchycena na plášti nastřelenými kotvami. Vyzdívka je dimenzována tak, aby teplota na plechovém plášti nepřesáhla teplotu, při níž by byla narušena pevnost pláště.

### 7.1 Základní parametry

Cyklon jsem navrhnul na základě vyhodnocení dat z jiných fluidních kotlů po odborné konzultaci s vedoucím práce.

- plášť cyklonu je plech o tloušťce 20 mm, materiál S235JR
- uvnitř cyklonu vyzdívka o tloušťce 340 mm, materiál žárobeton

Objem	$V_{cycl.}$	= 65	$[m^3]$
Vnější průměr horní části	$b$	= 4030	$[mm]$
Celková výška	$H$	= 13660	$[mm]$



Obrázek č. 7.1: Cyklonový odlučovač popílků

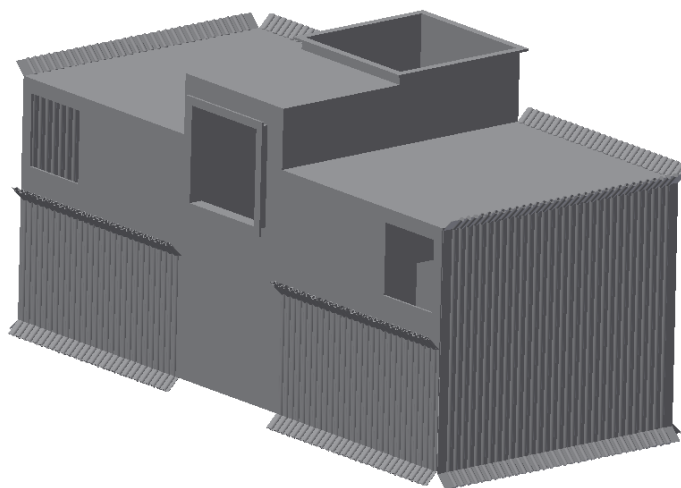
## 8 Fluidní uzávěr – regulační výměník tepla [4, 12]

Fluidní uzávěr je umístěn za cyklonem, ze kterého do něj vstupuje odloučený popel. Na dně jsou umístěny trysky, kterými proudí vzduch a profukuje vrstvu popela. Popel putuje střední cestou zpět do spalovací komory. Po obou stranách fluidního uzávěru jsou otvory, kterými propadáva popel do jeho postranních komor. Zde jsou na dně umístěny také trysky, které jsou zaktivovány v případě potřeby regulace výkonu kotle, respektive zvýšení jeho výkonu. Popel následně cirkuluje v postranních komorách. Každá strana je složena ze tří membránových stěn a jednoho vnořeného výměníku, ve kterých proudí voda z ekonomizéru. Tyto teplosměnné plochy jsou uvažovány jako výparník, vzniklá pára je tedy vedena dále směrem do kotlového tělesa. Všechny stěny jsou opatřeny vyzdívkou ze žárobetonu odolnému vůči abrazi a tepelným šokům je uchycena na nastřelených kotvách.

### 8.1 Základní parametry

- použité trubky jsou  $\varnothing 40 \times 4$ , materiál 16Mo3
- praporky PLO30x4, materiál 16Mo3
- regulační výměníky  $\varnothing 31,8 \times 4$ , materiál 16Mo3
- komory  $\varnothing 101,6 \times 20$ , materiál 16Mo3

Teplosměnná plocha	$S_{FU}$	= 133,2	$[m^2]$
Šířka	$a_{FU}$	= 5200	$[mm]$
Hloubka	$b_{FU}$	= 2000	$[mm]$
Výška	$h_{FU}$	= 2500	$[mm]$
Tloušťka vyzdívky	$t_{FU}$	= 70	$[mm]$



Obrázek č. 8.1: Fluidní uzávěr – regulační výměník

## 9 Návrh II. tahu [1, 3, 4, 5, 6]

Spaliny vstupují do II. tahu z cyklonového odlučovače přes potrubí s přechodem z kruhového na obdélníkový průřez a přes kompenzátor. První teplosměnnou plochou uvnitř spalínovodu se nachází nejprve svazek přehříváku 2. Stěny tahu jsou navrženy jako membránové a jsou uvažovány jako přehřívák 1. Pod přehříváky se nachází ekonomizér, složený ze tří částí, rozdělen mezerami o velikosti 0,6 m, pro jednodušší přístup kvůli případným opravám a revizím. Poslední částí druhého tahu je jednostupňový trubkový ohřívák vzduchu.

Celý kanál druhého tahu je zavěšen na konstrukci kotle a dilatuje směrem dolů. Za přehřívákem 1 je kanál pro spaliny konstruován z plechu o tloušťce 6 mm, který je v potřebných vzdálenostech vyztužen plochými tyčemi. Na konci se nachází výsypka pro popel, jenž se nezachytil v cyklonu, pod kterou je šnekový dopravník. Zadní strana kanálu má ve své spodní části výstupní otvor pro spaliny, které zde dosahují teploty 130 °C.

Veškeré součinitele tepelné vodivosti, kinematické viskozity, Prandtlova čísla, měrné objemy a další hodnoty použité ve výpočtech jsem zjistil pomocí programů EES a XSteam, podle tlaku a teploty daného média v určitém místě.

## 10 Ohřívák vzduchu [1, 2, 3, 5, 6, 8, 9, 11, 12]

Trubkový ohřívák vzduchu se nachází ve spodní části druhého tahu za ekonomizérem. Umístěn je na konstrukci kotle. Slouží k ohřátí vzduchu, který je potrubím veden pod rošt do spalovací komory. Průměr trubek jsem zvolil 38 mm, jako kompromis mezi lepším přestupem tepla, ale zároveň, aby se trubky tolik nezanášely, případně neucpávaly. Trubky jsou umístěny svisle a uspořádání trubek je vystřídáno pro lepší přestup tepla. Spaliny proudí uvnitř trubek, které jsou příčně omývány vzduchem.

### 10.1 Základní parametry

- použité trubky jsou  $\varnothing 38 \times 2$ , materiál E235 + CR1
- trubkovnice je z materiálu P20 - S355J2
- kanály jsou konstruovány z materiálu P6 – P265GH

Průměr trubek	$D$	$= 38$	$[mm]$
Tloušťka stěny trubek	$t_{tr}$	$= 2$	$[mm]$
Vnitřní průměr trubek	$d$	$= 34$	$[mm]$
Příčná rozteč trubek	$s_1$	$= 60$	$[mm]$
Podélná rozteč trubek	$s_2$	$= 40$	$[m]$
Úhlopříčná rozteč trubek	$s_{\bar{u}}$	$= 49$	$[mm]$
Rychlost spalin	$w_{sp}$	$= 11$	$[m \cdot s^{-1}]$
Rychlost vzduchu	$w_{vz}$	$= 5,5$	$[m \cdot s^{-1}]$
Součinitel přebytku vzduchu	$\alpha$	$= 1,3$	
Abs. hodnota podtlaku spalin	$\Delta p_{sp}$	$= 1,5$	$[kPa]$
Abs. hodnota podtlaku vzduchu	$\Delta p_{vz}$	$= 2,5$	$[kPa]$
Teplota spalin na vstupu	$t_{sp,in}$	$= 300$	$[^{\circ}C]$
Teplota spalin na výstupu	$t_{sp,out}$	$= 130$	$[^{\circ}C]$
Teplota vzduchu na vstupu	$t_{vz,in}$	$= 70$	$[^{\circ}C]$
Teplota vzduchu na výstupu	$t_{vz,out}$	$= 200$	$[^{\circ}C]$

## 10.2 Výpočet průtoků a rychlostí spalin a vzduchu

Střední teplota spalin

$$t_{stř,sp} = \frac{t_{sp,in} + t_{sp,out}}{2} \quad (10.1)$$

$$t_{stř,sp} = \frac{300 + 130}{2}$$

$$t_{stř,sp} = \mathbf{215\text{ }^{\circ}\text{C}}$$

Střední teplota vzduchu

$$t_{stř,vz} = \frac{t_{vz,in} + t_{vz,out}}{2} \quad (10.2)$$

$$t_{stř,vz} = \frac{70 + 200}{2}$$

$$t_{stř,vz} = \mathbf{135\text{ }^{\circ}\text{C}}$$

Střední objem vlhkých spalin

$$V_{stř,sp}^V = V_{sp,t}^V + (\alpha - 1) \cdot V_{vz,t}^V \quad (10.3)$$

$$V_{stř,sp}^V = 7,119 + (1,3 - 1) \cdot 6,7675$$

$$V_{stř,sp}^V = \mathbf{9,1492\text{ m}_N^3 \cdot \text{kg}^{-1}}$$

Skutečný průtok spalin

$$V_{sp,OVZ}^V = V_{stř,sp}^V \cdot \frac{t_{stř,sp} + 273}{273} \cdot \frac{p_b}{p_b - \Delta p_{sp}} \cdot m_{pal} \quad (10.4)$$

$$V_{sp,OVZ}^V = 9,1492 \cdot \frac{215 + 273}{273} \cdot \frac{0,101325}{0,101325 - 0,0015} \cdot 0,85$$

$$V_{sp,OVZ}^V = \mathbf{14,1008\text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}}$$

Skutečný průtok vzduchu

$$V_{vz,OVZ}^V = V_{vz,t}^V \cdot \alpha \cdot \frac{t_{stř,vz} + 273}{273} \cdot \frac{p_b}{p_b - \Delta p_{vz}} \cdot m_{pal} \quad (10.5)$$

$$V_{vz,OVZ}^V = 6,7675 \cdot 1,3 \cdot \frac{135 + 273}{273} \cdot \frac{0,101325}{0,101325 - 0,0025} \cdot 0,85$$

$$V_{vz,OVZ}^V = \mathbf{11,451\text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}}$$

Potřebný počet paralelních trubek pro spaliny

$$n_{tr} = \frac{4 \cdot V_{sp,OVZ}}{\pi \cdot d^2 \cdot w_{sp}} \quad (10.6)$$

$$n_{tr} = \frac{4 \cdot 14,1008}{\pi \cdot 0,034^2 \cdot 11}$$

$$n_{tr} = \mathbf{1411,8946} \Rightarrow \mathbf{1440}$$

Počet trubek v jedné řadě

$$z_1 = \frac{a}{s_1} + 1 \quad (10.7)$$

$$z_1 = \frac{2,1}{0,06} + 1$$

$$z_1 = \mathbf{36}$$

Počet řad svazku

$$z_2 = \frac{n_{tr}}{z_1} \quad (10.8)$$

$$z_2 = \frac{1440}{36}$$

$$z_2 = \mathbf{40}$$

Hloubka OVZ

$$b = (z_2 - 1) \cdot s_2 \quad (10.9)$$

$$b = (40 - 1) \cdot 0,04$$

$$b = \mathbf{1,56\ m}$$

Korekce rychlosti spalin

$$w_{sp} = \frac{4 \cdot V_{sp,OVZ}}{n_{tr} \cdot \pi \cdot d^2} \quad (10.10)$$

$$w_{sp} = \frac{4 \cdot 14,1008}{1440 \cdot \pi \cdot 0,034^2}$$

$$w_{sp} = \mathbf{10,79\ m \cdot s^{-1}}$$

Výška jednoho obratu

$$h = \frac{V_{vz,OVZ} \cdot s_1}{a \cdot w_{vz} \cdot (s_1 - D)} \quad (10.11)$$

$$h = \frac{11,451 \cdot 0,06}{2,1 \cdot 5,5 \cdot (0,06 - 0,038)}$$

$$h = \mathbf{0,99\,m}$$

### 10.3 Výpočet přestupu tepla

Poměrná příčná rozteč trubek

$$\sigma_1 = \frac{s_1}{D} \quad (10.12)$$

$$\sigma_1 = \frac{0,06}{0,038}$$

$$\sigma_1 = \mathbf{1,6}$$

Poměrná podélná rozteč trubek

$$\sigma_2 = \frac{s_2}{D} \quad (10.13)$$

$$\sigma_2 = \frac{0,04}{0,038}$$

$$\sigma_2 = \mathbf{1}$$

Poměrná úhlopříčná rozteč trubek

$$\sigma'_2 = \sqrt{0,25 \cdot \sigma_1^2 + \sigma_2^2} \quad (10.14)$$

$$\sigma'_2 = \sqrt{0,25 \cdot 1,6^2 + 1^2}$$

$$\sigma'_2 = \mathbf{1,3}$$

Parametr  $\phi_\sigma$

$$\phi_\sigma = \frac{\sigma_1 - 1}{\sigma'_2 - 1} \quad (10.15)$$

$$\phi_\sigma = \frac{1,6 - 1}{1,3 - 1}$$

$$\phi_\sigma = \mathbf{2}$$



Korekční součinitel na uspořádání svazku

$$C_s = 0,275 \cdot \phi_\sigma^{0,5} \quad (10.16)$$

$$C_s = 0,275 \cdot 2^{0,5}$$

$$C_s = \mathbf{0,3889}$$

Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně vzduchu

$$\alpha_{vz} = C_z \cdot C_s \cdot \frac{\lambda_{vz}}{D} \cdot \left( \frac{w_{vz} \cdot D}{\nu_{vz}} \right)^{0,6} \cdot Pr_{vz}^{0,33} \quad (10.17)$$

$$\alpha_{vz} = 1 \cdot 0,3889 \cdot \frac{0,03399}{0,038} \cdot \left( \frac{5,5 \cdot 0,038}{15,23 \cdot 10^{-5}} \right)^{0,6} \cdot 0,0698^{0,33}$$

$$\alpha_{vz} = \mathbf{11,026 \, W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}}$$

$C_z$  ... korekční součinitel na počet řad v podélném směru

$\lambda_{vz}$  ... součinitel tepelné vodivosti vzduchu [W · m<sup>-1</sup> · K<sup>-1</sup>]

$\nu_{vz}$  ... kinematická viskozita vzduchu [m<sup>2</sup> · s<sup>-1</sup>]

$Pr_{vz}$  ... Prandtlovo číslo vzduchu

Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně spalín

$$\alpha_{sp} = 0,023 \cdot \frac{\lambda_{sp}}{d} \cdot \left( \frac{w_{sp} \cdot d}{\nu_{sp}} \right)^{0,6} \cdot Pr_{sp}^{0,33} \quad (10.18)$$

$$\alpha_{sp} = 0,023 \cdot \frac{4,1345 \cdot 10^{-2}}{0,034} \cdot \left( \frac{10,79 \cdot 0,034}{3,4752 \cdot 10^{-5}} \right)^{0,6} \cdot Pr_{sp}^{0,33}$$

$$\alpha_{sp} = \mathbf{39,35 \, W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}}$$

$\lambda_{sp}$  ... součinitel tepelné vodivosti spalín [W · m<sup>-1</sup> · K<sup>-1</sup>]

$\nu_{sp}$  ... kinematická viskozita spalín [m<sup>2</sup> · s<sup>-1</sup>]

$Pr_{sp}$  ... Prandtlovo číslo spalín

Součinitel prostupu tepla

$$k_{OVZ} = \xi \cdot \frac{\alpha_{sp} \cdot \alpha_{vz}}{\alpha_{sp} + \alpha_{vz}} \quad (10.19)$$

$$k_{OVZ} = 0,85 \cdot \frac{39,35 \cdot 11,026}{39,35 + 11,026}$$

$$k_{OVZ} = \mathbf{7,321 \, W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}}$$

$\xi$  ... opravný součinitel využití plochy ohříváku vzduchu

Menší rozdíl teplot médií - vzduch

$$\tau_m = t_{vz,out} - t_{vz,in} \quad (10.20)$$

$$\tau_m = 200 - 70$$

$$\tau_m = \mathbf{130\text{ }^{\circ}\text{C}}$$

Větší rozdíl teplot médií - spaliny

$$\tau_v = t_{sp,in} - t_{sp,out} \quad (10.21)$$

$$\tau_v = 300 - 130$$

$$\tau_v = \mathbf{170\text{ }^{\circ}\text{C}}$$

Korekce na křížový proud

$$P = \frac{\tau_m}{t_{sp,in} - t_{vz,in}} \quad (10.22)$$

$$P = \frac{130}{300 - 70}$$

$$P = \mathbf{0,5652}$$

$$R = \frac{\tau_v}{\tau_m} \quad (10.23)$$

$$R = \frac{170}{130}$$

$$R = \mathbf{1,3077}$$

Střední logaritmický teplotní spád

$$\Delta t_{ln} = \frac{\Delta t' - \Delta t''}{\ln \frac{\Delta t'}{\Delta t''}} \cdot \psi = \frac{(t_{sp,in} - t_{vz,out}) - (t_{sp,out} - t_{vz,in})}{\ln \frac{(t_{sp,in} - t_{vz,out})}{(t_{sp,out} - t_{vz,in})}} \cdot \psi \quad 10.24)$$

$$\Delta t_{ln} = \frac{(300 - 200) - (130 - 70)}{\ln \frac{(300 - 200)}{(130 - 70)}} \cdot 0,92$$

$$\Delta t_{ln} = \mathbf{72\text{ }K}$$

$\psi$  ... korekce na křížový proud určena z diagramu v literatuře [4]

Výkon OVZ

$$Q_{OVZ} = m_{pal} \cdot (i_{OVZ,out} - i_{OVZ,in}) \quad (10.25)$$

$$Q_{OVZ} = 0,85 \cdot (475,8 - 343,8)$$

$$Q_{OVZ} = \mathbf{145,76 \text{ kW}}$$

$$i_{OVZ,in} \dots \text{entalpie vzduchu na vstupu} \quad [kJ \cdot kg^{-1}]$$

$$i_{OVZ,out} \dots \text{entalpie vzduchu na výstupu} \quad [kJ \cdot kg^{-1}]$$

Výhřevná plocha

$$S_{OVZ} = \frac{Q_{OVZ}}{k_{OVZ} \cdot \Delta t_{ln}} \quad (10.26)$$

$$S_{OVZ} = \frac{145,76}{7,321 \cdot 72}$$

$$S_{OVZ} = \mathbf{276,4 \text{ m}^2}$$

Výška OVZ

$$H = \frac{S_{OVZ}}{n_{tr} \cdot \pi \cdot d_s} \quad (10.27)$$

$$H = \frac{276,4}{1440 \cdot \pi \cdot 0,036}$$

$$H = \mathbf{1,7 \text{ m}}$$

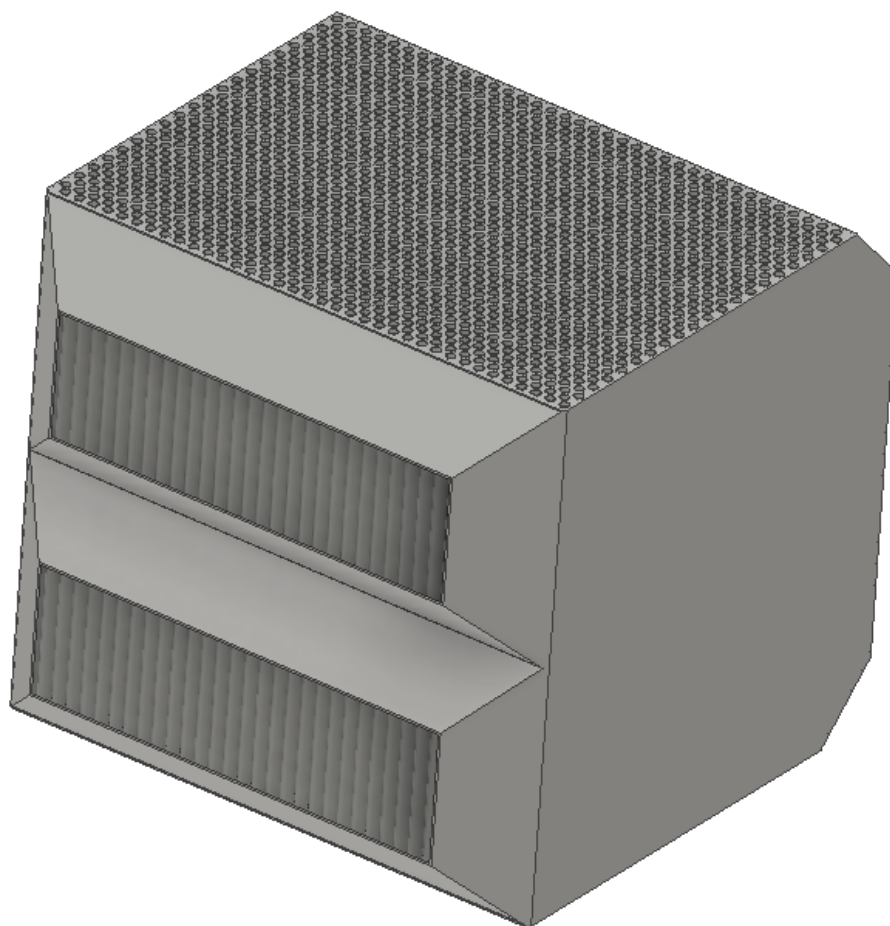
$$d_s \dots \text{střední průměr trubek} \quad [m]$$

Počet obrátů

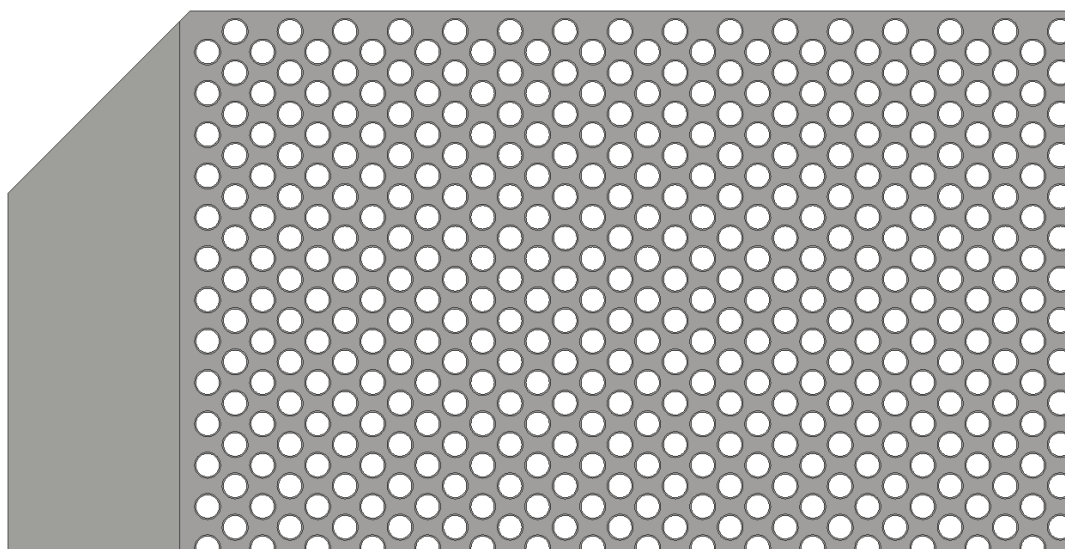
$$i = \frac{H}{h} \quad (10.28)$$

$$i = \frac{1,7}{0,99}$$

$$i = \mathbf{2}$$



Obrázek č. 10.1: Ohřívák vzduchu



Obrázek č. 10.2: Detail geometrie ohříváku vzduchu

## 11 Ohřívák vody [1, 2, 3, 5, 6, 8, 9, 11, 12]

Ekonomizér se nachází v prostřední části druhého tahu kotle. Je položen na dutých krabicích z plochých tyčí, které jsou umístěny na konstrukci kotle. Proti proudu spalin je do trubek přiváděna napájecí voda, která je po ohřátí na potřebné parametry dále vedena do bubnu kotle. Pro zaručení dobrého odvodnění je ohřívák vody konstruován horizontálně a je rozdělen na 3 části. Geometrie trubek je vystřídána, aby docházelo k intenzivnějšímu přestupu tepla. Spaliny proudí přes svazky napříč.

### 11.1 Základní parametry

- použité trubky jsou  $\varnothing 31,8 \times 2,9$ , materiál P265GH
- krabice uvnitř kanálu PLO100x16, materiál 16Mo3

Průměr trubek	$D$	$= 31,8$	$[mm]$
Tloušťka stěny trubek	$t_{tr}$	$= 2,9$	$[mm]$
Vnitřní průměr trubek	$d$	$= 26$	$[mm]$
Rychlost spalin	$w_{sp}$	$= 10$	$[m \cdot s^{-1}]$
Rychlost vody	$w_w$	$= 0,5$	$[m \cdot s^{-1}]$
Abs. hodnota podtlaku spalin	$\Delta p_{sp}$	$= 1,5$	$[kPa]$
Teplota spalin na vstupu	$t_{sp,in}$	$= 480$	$[^{\circ}C]$
Teplota spalin na výstupu	$t_{sp,out}$	$= 300$	$[^{\circ}C]$
Teplota vzduchu na vstupu	$t_{NV}$	$= 155$	$[^{\circ}C]$
Teplota vzduchu na výstupu	$t_b$	$= 245$	$[^{\circ}C]$

## 11.2 Výpočet průtoku spalín

Podélná rozteč trubek

$$s_2 = 1,5 \cdot D \quad (11.1)$$

$$s_2 = 1,5 \cdot 0,0318$$

$$s_2 = \mathbf{0,05\ m}$$

Střední teplota spalín

$$t_{stř,sp} = \frac{t_{sp,in} + t_{sp,out}}{2} \quad (11.2)$$

$$t_{stř,sp} = \frac{t_{sp,in} + t_{sp,out}}{2}$$

$$t_{stř,sp} = \mathbf{390\ ^\circ C}$$

Střední objem vlhkých spalín

$$V_{stř,sp}^V = V_{sp,t}^V + (\alpha - 1) \cdot V_{vz,t}^V \quad (11.3)$$

$$V_{stř,sp}^V = 7,119 + (1,3 - 1) \cdot 6,7675$$

$$V_{stř,sp}^V = \mathbf{9,15\ m^3 \cdot kg^{-1}}$$

Skutečný průtok spalín v EKO

$$V_{sp,EKO}^V = V_{stř,sp}^V \cdot \frac{t_{stř,sp} + 273}{273} \cdot \frac{p_b}{p_b - \Delta p_{sp}} \cdot m_{pal} \quad (11.4)$$

$$V_{sp,EKO}^V = 9,15 \cdot \frac{390 + 273}{273} \cdot \frac{0,101325}{0,101325 - 0,0015} \cdot 0,85$$

$$V_{sp,EKO}^V = \mathbf{19,1574\ m^3 \cdot s^{-1}}$$

Potřebný počet paralelních trubek

$$n_{tr} = \frac{4 \cdot (M_p - M_v) \cdot v_w}{\pi \cdot d^2 \cdot w_w} \quad (11.5)$$

$$n_{tr} = \frac{4 \cdot (7,1 - 0,36) \cdot 10,89 \cdot 10^{-4}}{\pi \cdot 0,026^2 \cdot 0,5}$$

$$n_{tr} = \mathbf{28}$$

$$v_w \dots \text{měrný objem vody} \quad [m^3 \cdot kg^{-1}]$$

Počet trubek v jedné řadě

$$z_1 = \frac{n_{tr}}{2} \quad (11.6)$$

$$z_1 = \frac{28}{2}$$

$$z_1 = \mathbf{14}$$

Příčná rozteč svazku

$$s_1 = \frac{a - 0,25}{z_1 - 1} \quad (11.7)$$

$$s_1 = \frac{2,1 - 0,25}{14 - 1}$$

$$s_1 = \mathbf{0,15\ m}$$

Boční průměr spalínového průtahu

$$b = \frac{V_{sp,EKO}^V \cdot s_1}{a \cdot w_{sp} \cdot (s_1 - D)} \quad (11.8)$$

$$b = \frac{19,1574 \cdot 0,15}{2,1 \cdot 10 \cdot (0,15 - 0,0318)}$$

$$b = \mathbf{1,16\ m} \Rightarrow \mathbf{1,6\ m}$$

### 11.3 Výpočet přestupu tepla

Poměrná příčná rozteč trubek

$$\sigma_1 = \frac{s_1}{D} \quad (11.9)$$

$$\sigma_1 = \frac{0,15}{0,0318}$$

$$\sigma_1 = \mathbf{4,7}$$

Poměrná podélná rozteč trubek

$$\sigma_2 = \frac{s_2}{D} \quad (11.10)$$

$$\sigma_2 = \frac{0,05}{0,0318}$$

$$\sigma_2 = \mathbf{1,6}$$

Poměrná úhlopříčná rozteč trubek

$$\sigma'_2 = \sqrt{0,25 \cdot \sigma_1^2 + \sigma_2^2} \quad (11.11)$$

$$\sigma'_2 = \sqrt{0,25 \cdot 4,7^2 + 1,6^2}$$

$$\sigma'_2 = \mathbf{2,8}$$

Parametr  $\phi_\sigma$

$$\phi_\sigma = \frac{\sigma_1 - 1}{\sigma'_2 - 1} \quad (11.12)$$

$$\phi_\sigma = \frac{4,7 - 1}{2,8 - 1}$$

$$\phi_\sigma = \mathbf{2,03}$$

Korekční součinitel na uspořádání svazku

$$C_s = 0,275 \cdot \phi_\sigma^{0,5} \quad (11.13)$$

$$C_s = 0,275 \cdot 2^{0,5}$$

$$C_s = \mathbf{0,3914}$$

Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně spalin

$$\alpha_{sp} = C_z \cdot C_s \cdot \frac{\lambda_{sp}}{D} \cdot \left( \frac{w_{sp} \cdot D}{\nu_{sp}} \right)^{0,6} \cdot Pr_{sp}^{0,33} \quad (11.14)$$

$$\alpha_{sp} = 1 \cdot 0,3914 \cdot \frac{0,05614}{0,0318} \cdot \left( \frac{10 \cdot 0,0318}{5,641 \cdot 10^{-5}} \right)^{0,6} \cdot 0,641^{0,33}$$

$$\alpha_{sp} = \mathbf{106,27 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}}$$

Součinitel zanesení

$$\varepsilon_z = \varepsilon_{zo} \cdot C_d \cdot C_{fr} + \Delta\varepsilon_z \quad (11.15)$$

$$\varepsilon_z = 0,002 \cdot 0,85 \cdot 1 + 0,0015$$

$$\varepsilon_z = \mathbf{0,0032 \text{ m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}}$$

$$\varepsilon_{zo} \dots \text{základní hodnota součinitele zanesení} \quad [\text{m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}]$$

$C_d$  ... korekce na průměr trubek

$C_{fr}$  ... korekce na průměr popílkových částic

$$\Delta\varepsilon_z \dots \text{přirážka součinitele zanesení} \quad [\text{m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}]$$



Součinitel prostupu tepla

$$k_{EKO} = \frac{\alpha_{sp}}{1 + \varepsilon_z \cdot \alpha_{sp}} \quad (11.16)$$

$$k_{EKO} = \frac{106,27}{1 + 0,0032 \cdot 106,27}$$

$$k_{EKO} = \mathbf{79,3 \, W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}}$$

Střední logaritmický teplotní spád

$$\Delta t_{ln} = \frac{\Delta t' - \Delta t''}{\ln \frac{\Delta t'}{\Delta t''}} = \frac{(t_{sp,in} - t_b) - (t_{sp,out} - t_{NV})}{\ln \frac{(t_{sp,in} - t_b)}{(t_{sp,out} - t_{NV})}} \quad (11.17)$$

$$\Delta t_{ln} = \frac{(480 - 245) - (300 - 155)}{\ln \frac{(480 - 245)}{(300 - 155)}}$$

$$\Delta t_{ln} = \mathbf{186,4 \, K}$$

Výkon EKO

$$Q_{EKO} = (M_p - M_v) \cdot (i_b - i_{NV}) \quad (11.18)$$

$$Q_{EKO} = (7,1 - 0,36) \cdot (653,9 - 1061,5)$$

$$Q_{EKO} = \mathbf{2749,1 \, kW}$$

$$i_b \dots \text{entalpie ohřáté vody do bubnu} \quad [kJ \cdot kg^{-1}]$$

$$i_{NV} \dots \text{entalpie napajecí vody} \quad [kJ \cdot kg^{-1}]$$

Výhřevná plocha

$$S_{EKO} = \frac{Q_{EKO}}{k_{EKO} \cdot \Delta t_{ln}} \quad (11.19)$$

$$S_{EKO} = \frac{2749,1 \cdot 1000}{79,3 \cdot 186,4}$$

$$S_{EKO} = \mathbf{185,98 \, m^2}$$

Délka jedné trubky

$$L = \frac{S_{EKO}}{n_{tr} \cdot \pi \cdot D} \quad (11.20)$$

$$L = \frac{185,98}{28 \cdot \pi \cdot 0,0318}$$

$$L = \mathbf{66,5 \, m}$$

Počet řad

$$z_2 = \frac{L}{b} \cdot 2 \quad (11.21)$$

$$z_2 = \frac{66,5}{1,6} \cdot 2$$

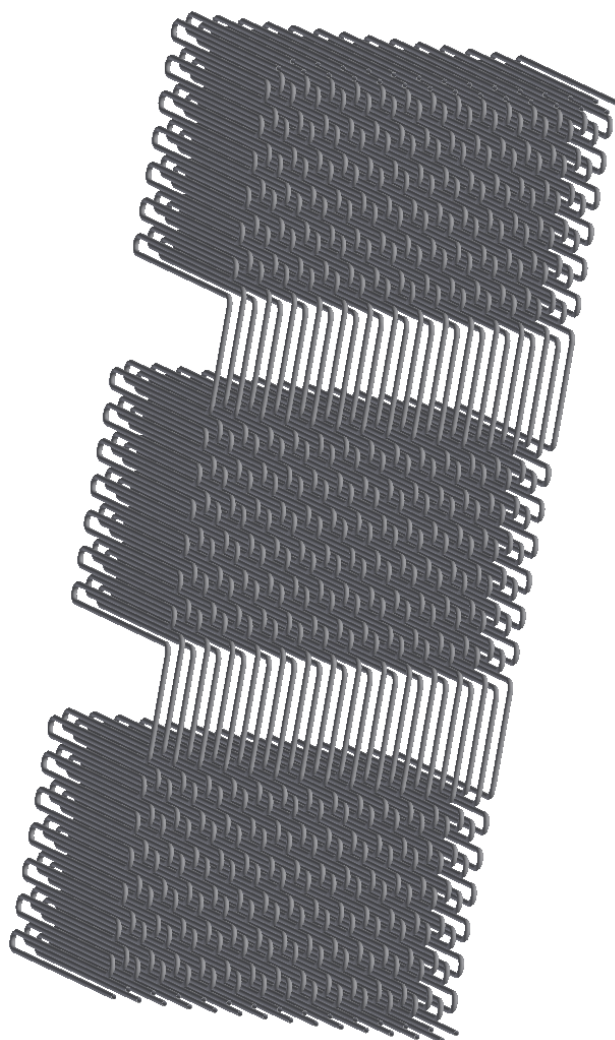
$$z_2 = 83,1 \Rightarrow 84$$

Výška svazku dělicí EKO na 3 díly, včetně mezer

$$H = (z_2 - 1) \cdot s_2 + 2 \cdot 0,6 \quad (11.22)$$

$$H = (84 - 1) \cdot 0,05 + 2 \cdot 0,6$$

$$H = 5,35 \text{ m}$$



Obrázek č. 11.1.: Ohřívací voda

## 12 Přehřívák 1 [2, 4, 12]

Je součástí druhého tahu, vyroben z membránových stěn. Nachází se v horní části a vstupují do něj spaliny z cyklonu. Konstrukčně je navržen jako protiproudý. Do spodních komor vstupuje pára z kotlového tělesa. Za přehřívákem je umístěn vstřík napájecí vody, aby došlo k regulaci teploty páry na potřebnou hodnotu před vstupem do přehříváku 2.

### 12.1 Výpočet

Na základě zhodnocení a přepočtení některých parametrů z jiných fluidní kotlů jsem po konzultaci s vedoucím práce zvolil součinitel prostupu tepla  $k = 261,4 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$  a výkon přehříváku 1 je  $Q_{PŘ1} = 3684,6 \text{ kW}$ .

Logaritmický teplotní spád

$$\Delta t_{ln} = \frac{\Delta t' - \Delta t''}{\ln \frac{\Delta t'}{\Delta t''}} = \frac{(t_{sp,in} - t_{PŘ1,out}) - (t_{sp,out} - t_{p,b})}{\ln \frac{(t_{sp,in} - t_{PŘ1,out})}{(t_{sp,out} - t_{p,b})}} \quad (12.1)$$

$$\Delta t_{ln} = \frac{(850 - 400) - (480 - 310)}{\ln \frac{(850 - 400)}{(480 - 310)}}$$

$$\Delta t_{ln} = \mathbf{287,64 \text{ K}}$$

$$t_{p,b} \dots \text{teplota páry z bubnu} \quad [^{\circ}\text{C}]$$

$$t_{PŘ1,out} \dots \text{teplota páry na výstupu z přehříváku 1} \quad [^{\circ}\text{C}]$$

Teplosměnná plocha spalovací komory

$$S_{PŘ1} = \frac{Q_{PŘ1}}{k \cdot \Delta t_{ln}} \quad (12.2)$$

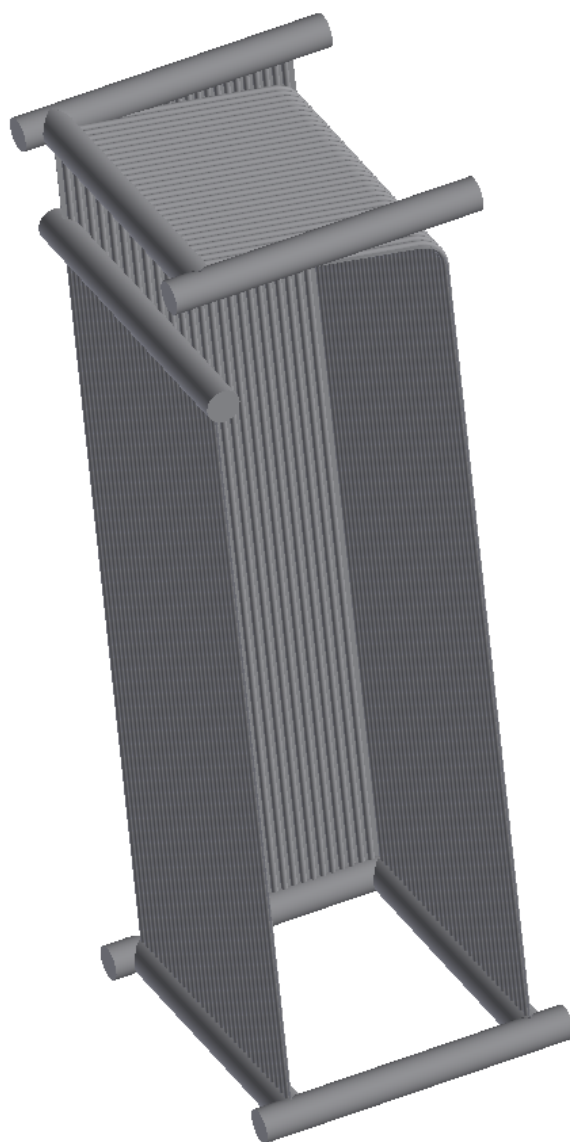
$$S_{PŘ1} = \frac{3684,6 \cdot 1000}{261,4 \cdot 287,64}$$

$$S_{PŘ1} = \mathbf{49 \text{ m}^2}$$

## 12.2 Základní parametry

- použité trubky jsou  $\varnothing 44,5 \times 5$ , materiál 16Mo3
- praporky PLO20x5, materiál 16Mo3
- komory  $\varnothing 219,1 \times 25$ , materiál 16Mo3

Teplota spalin na vstupu	$t_{sp,in}$	= 850	[°C]
Teplota spalin na výstupu	$t_{sp,out}$	= 480	[°C]
Teplota vzduchu na vstupu	$t_{p,b}$	= 310	[°C]
Teplota vzduchu na výstupu	$t_{PŘ1,out}$	= 400	[°C]



Obrázek č. 12.1: Přehřívák 1

## 13 Přehřívák 2 [1, 2, 3, 5, 6, 8, 9, 11, 12]

Výstupní konvekční přehřívák je zavěšen na závěsech jako první teplosměnná plocha uvnitř druhého tahu. Chlazené závěsy jsou součástí tohoto přehříváku. Teplota páry vstupující do spodní komory je regulována vstřikem napájecí vody před tímto přehřívákem. Navržen je jako protiproudý výměník tepla.

### 13.1 Základní parametry

- použité trubky jsou  $\varnothing 31,8 \times 4$ , materiál vysoce legovaná ocel P91 (X10CrMoVNb9-1)
- komory  $\varnothing 219,1 \times 25$ , materiál 16Mo3

Průměr trubek	$D$	$= 31,8$	$[mm]$
Tloušťka stěny trubek	$t_{tr}$	$= 4$	$[mm]$
Vnitřní průměr trubek	$d$	$= 23,8$	$[mm]$
Rychlost spalin	$w_{sp}$	$= 10$	$[m \cdot s^{-1}]$
Tlak spalin	$p_{sp}$	$= 0,1$	$[MPa]$
Abs. hodnota podtlaku spalin	$\Delta p_{sp}$	$= 1,5$	$[kPa]$
Poměrný úlet popílku	$X_{\dot{u}}$	$= 0,5$	
Stř. efektivní průměr částic popílku	$d_{pk}$	$= 20$	$[\mu m]$
Stupeň černosti povrchu stěn	$a_{st}$	$= 0,8$	
Teplota spalin na vstupu	$t_{sp,in}$	$= 850$	$[^{\circ}C]$
Teplota spalin na výstupu	$t_{sp,out}$	$= 480$	$[^{\circ}C]$
Teplota páry na vstupu	$t_{p,in}$	$= 400$	$[^{\circ}C]$
Teplota páry na výstupu	$t_{p,out}$	$= 535$	$[^{\circ}C]$

### 13.2 Výpočet průtoků, rychlostí a součinitele přestupu tepla spalin a páry

Podélná rozteč trubek

$$s_2 = 1,5 \cdot D \quad (13.1)$$

$$s_2 = 1,5 \cdot 0,0318$$

$$s_2 = \mathbf{0,05\ m}$$

Příčná rozteč trubek

$$s_1 = 4 \cdot D \quad (13.2)$$

$$s_1 = 4 \cdot 0,0318$$

$$s_1 = \mathbf{0,128\ m}$$

Počet trubek v řadě

$$z_1 = \frac{a - 0,25}{s_1} + 1 \quad (13.3)$$

$$z_1 = \frac{2,1 - 0,25}{0,128} + 1$$

$$z_1 = \mathbf{15,45 \Rightarrow 16}$$

Počet trubek

$$n_{tr} = 2 \cdot z_1 \quad (13.4)$$

$$n_{tr} = 2 \cdot 16$$

$$n_{tr} = \mathbf{32}$$

Střední teplota páry

$$t_{stř,p} = \frac{t_{p,in} + t_{p,out}}{2} \quad (13.5)$$

$$t_{stř,p} = \frac{400 + 535}{2}$$

$$t_{stř,p} = \mathbf{467,5\ ^\circ C}$$

Rychlost páry

$$w_p = \frac{4 \cdot (M_p - M_v) \cdot v_p}{n_{tr} \cdot \pi \cdot d^2} \quad (13.6)$$

$$w_p = \frac{4 \cdot (7,1 - 0,36) \cdot 0,03467}{32 \cdot \pi \cdot 0,0238^2}$$

$$w_p = \mathbf{16,43 \, m \cdot s^{-1}}$$

$$v_p \dots \text{měrný objem páry} \quad [m^3 \cdot kg^{-1}]$$

Součinitel přestupu tepla na straně páry

$$\alpha_p = 0,023 \cdot \frac{\lambda_p}{d} \cdot \left( \frac{w_p \cdot d}{\eta_p \cdot v_p} \right)^{0,8} \cdot Pr_p^{0,4} \quad (13.7)$$

$$\alpha_p = 0,023 \cdot \frac{0,07036}{0,0238} \cdot \left( \frac{16,43 \cdot 0,0238}{2,746 \cdot 10^{-5} \cdot 0,03467} \right)^{0,8} \cdot 1,017^{0,4}$$

$$\alpha_p = \mathbf{2119,1 \, W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}}$$

$$\lambda_p \dots \text{součinitel tepelné vodivosti páry} \quad [W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}]$$

$$\eta_p \dots \text{dynamická viskozita páry} \quad [Pa \cdot s^{-1}]$$

$$Pr_p \dots \text{Prandtlovo číslo páry}$$

Střední teplota spalin

$$t_{stř,sp} = \frac{t_{sp,in} + t_{sp,out}}{2} \quad (13.8)$$

$$t_{stř,sp} = \frac{850 + 480}{2}$$

$$t_{stř,sp} = \mathbf{665 \, ^\circ C}$$

Střední objem vlhkých spalin

$$V_{stř,sp}^V = V_{sp,t}^V + (\alpha - 1) \cdot V_{vz,t}^V \quad (13.9)$$

$$V_{stř,sp}^V = 7,119 + (1,3 - 1) \cdot 6,7675$$

$$V_{stř,sp}^V = \mathbf{9,15 \, m^3 \cdot kg^{-1}}$$

Skutečný průtok spalín v PŘ2

$$V_{sp,PŘ2} = V_{stř,sp}^V \cdot \frac{t_{stř,sp} + 273}{273} \cdot \frac{p_b}{p_b - \Delta p_{sp}} \cdot m_{pal} \quad (13.10)$$

$$V_{sp,PŘ2} = 9,15 \cdot \frac{665 + 273}{273} \cdot \frac{0,101325}{0,101325 - 0,0015} \cdot 0,85$$

$$V_{sp,PŘ2} = \mathbf{27,1 \, m^3 \cdot s^{-1}}$$

Rychlost spalín v PŘ2

$$w_{sp} = \frac{V_{sp,PŘ2} \cdot s_1}{a \cdot b \cdot (s_1 - D)} \quad (13.11)$$

$$w_{sp} = \frac{27,1 \cdot 0,128}{2,1 \cdot 1,6 \cdot (0,128 - 0,0318)}$$

$$w_{sp} = \mathbf{10,73 \, m \cdot s^{-1}}$$

Poměrná příčná rozteč trubek

$$\sigma_1 = \frac{s_1}{D} \quad (13.12)$$

$$\sigma_1 = \frac{0,128}{0,0318}$$

$$\sigma_1 = \mathbf{4}$$

Poměrná podélná rozteč trubek

$$\sigma_2 = \frac{s_2}{D} \quad (13.13)$$

$$\sigma_2 = \frac{0,05}{0,0318}$$

$$\sigma_2 = \mathbf{1,6}$$

Poměrná úhlopříčná rozteč trubek

$$\sigma'_2 = \sqrt{0,25 \cdot \sigma_1^2 + \sigma_2^2} \quad (13.14)$$

$$\sigma'_2 = \sqrt{0,25 \cdot 4^2 + 1,6^2}$$

$$\sigma'_2 = \mathbf{2,6}$$



Parametr  $\phi_\sigma$

$$\phi_\sigma = \frac{\sigma_1 - 1}{\sigma'_2 - 1} \quad (13.15)$$

$$\phi_\sigma = \frac{4 - 1}{2,6 - 1}$$

$$\phi_\sigma = \mathbf{1,95}$$

Korekční součinitel na uspořádání svazku

$$C_s = 0,275 \cdot \phi_\sigma^{0,5} \quad (13.16)$$

$$C_s = 0,275 \cdot 1,95^{0,5}$$

$$C_s = \mathbf{0,3837}$$

Součinitel přestupu tepla konvekcí na straně spalín

$$\alpha_{sp,k} = C_z \cdot C_s \cdot \frac{\lambda_{sp}}{D} \cdot \left( \frac{w_{sp} \cdot D}{\nu_{sp}} \right)^{0,6} \cdot Pr_{sp}^{0,33} \quad (13.17)$$

$$\alpha_{sp,k} = 1 \cdot 0,3837 \cdot \frac{7,973 \cdot 10^{-2}}{0,0318} \cdot \left( \frac{10,73 \cdot 0,0318}{10,563 \cdot 10^{-5}} \right)^{0,6} \cdot 0,6265^{0,33}$$

$$\alpha_{sp,k} = \mathbf{105,14 \, W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}}$$

Hmotnost spalín

$$G_{sp} = 1 - A^r + 1,306 \cdot \alpha \cdot V_{vz,t}^V \quad (13.18)$$

$$G_{sp} = 1 - 0,16 + 1,306 \cdot 1,3 \cdot 6,7675$$

$$G_{sp} = \mathbf{12,33 \, kg \cdot kg^{-1}}$$

Koncentrace popílku ve spalínách

$$\mu_{sp} = \frac{A^r \cdot (X_{\dot{u}} + 1)}{2 \cdot G_{sp}} \quad (13.19)$$

$$\mu_{sp} = \frac{0,16 \cdot (0,5 + 1)}{2 \cdot 12,33}$$

$$\mu_{sp} = \mathbf{0,00973 \, kg \cdot kg^{-1}}$$

Součinitel zeslabení sálání popílkovými částicemi

$$k_p = \frac{57000}{\sqrt[3]{d_{pk}^2 \cdot (t_{stř,sp} + 273,15)^2}} \quad (13.20)$$

$$k_p = \frac{57000}{\sqrt[3]{20^2 \cdot (665 + 273,15)^2}}$$

$$k_p = \mathbf{81}$$

Objemová koncentrace vodní páry ve spalínách

$$r_{H_2O} = \frac{V_{sp,H_2O} + (\chi_v - 1) \cdot (\alpha - 1) \cdot V_{vz,t}^S}{V_{sp,t}^V + (\alpha_{PŘ2} - 1) \cdot V_{vz,t}^V} \quad (13.21)$$

$$r_{H_2O} = \frac{0,635 + (1,016 - 1) \cdot (1,3 - 1) \cdot 6,66}{7,119 + (1,3 - 1) \cdot 6,7675}$$

$$r_{H_2O} = \mathbf{0,073}$$

Objemová koncentrace CO<sub>2</sub> a SO<sub>2</sub> ve spalínách

$$r_{RO_2} = \frac{V_{CO_2} + V_{SO_2}}{V_{sp,t}^V + (\alpha - 1) \cdot V_{vz,t}^V} \quad (13.22)$$

$$r_{RO_2} = \frac{1,213 + 0,0039}{7,119 + (1,3 - 1) \cdot 6,7675}$$

$$r_{RO_2} = \mathbf{0,133}$$

Objemová koncentrace 3-atomových plynů ve spalínách

$$r_s = r_{H_2O} + r_{RO_2} \quad (13.23)$$

$$r_s = 0,073 + 0,133$$

$$r_s = \mathbf{0,206}$$

Parciální tlak 3-atomových plynů ve spalínách

$$p_s = r_s \cdot p_{sp} \quad (13.24)$$

$$p_s = 0,206 \cdot 0,1$$

$$p_s = \mathbf{20,6 \text{ kPa}}$$

Efektivní tloušťka sálové vrstvy

$$s = 0,9 \cdot D \cdot \left( \frac{4}{\pi} \cdot \frac{s_1 \cdot s_2}{D^2} - 1 \right) \quad (13.25)$$

$$s = 0,9 \cdot 0,0318 \cdot \left( \frac{4}{\pi} \cdot \frac{0,128 \cdot 0,05}{0,0318^2} - 1 \right)$$

$$s = \mathbf{0,202 \text{ m}}$$

Součinitel zeslabení sálání 3-atomovými plyny

$$k_s = \left[ \frac{7,8 + 16 \cdot r_{H_2O}}{3,16 \cdot \sqrt{(p_s \cdot s)}} - 1,02 \right] \cdot \left( 1 - 0,37 \cdot \frac{t_{stf,sp} + 273,15}{1000} \right) \quad (13.26)$$

$$k_s = \left[ \frac{7,8 + 16 \cdot 0,073}{3,16 \cdot \sqrt{(20,6 \cdot 1000 \cdot 0,202)}} - 1,02 \right] \cdot \left( 1 - 0,37 \cdot \frac{665 + 273,15}{1000} \right)$$

$$k_s = \mathbf{28,06}$$

Optická hustota spalín

$$kps = (k_s \cdot r_s + k_p \cdot \mu_{sp}) \cdot p_{sp} \cdot s \quad (13.27)$$

$$kps = (28,06 \cdot 0,206 + 81 \cdot 9,73 \cdot 10^3) \cdot 0,1 \cdot 0,202$$

$$kps = \mathbf{0,133}$$

Stupeň černosti spalín

$$a_{sp} = 1 - e^{-kps} \quad (13.28)$$

$$a_{sp} = 1 - e^{-0,133}$$

$$a_{sp} = \mathbf{0,124}$$

Součinitel zanesení

$$\varepsilon_z = \varepsilon_{zo} \cdot C_d \cdot C_{fr} + \Delta\varepsilon_z \quad (13.29)$$

$$\varepsilon_z = 0,0035 \cdot 0,8 \cdot 1 + 0,0025$$

$$\varepsilon_z = \mathbf{0,0053 \text{ m}^2 \cdot K \cdot W^{-1}}$$

Teplota povrchu nánosů na straně spalín

$$t_z = t_{stř,p} + \left(\varepsilon_z + \frac{1}{\alpha_p}\right) \cdot \frac{(M_p - M_v) \cdot (i_p - i_{PŘ1,out})}{S} \quad (13.30)$$

$$t_z = 467,5 + \left(0,0053 + \frac{1}{2119,1}\right) \cdot \frac{(7,1 - 0,36) \cdot (3471 - 3118,8)}{195}$$

$$t_z = \mathbf{467,57\text{ }^{\circ}\text{C}}$$

$$i_p \dots \text{entalpie jmenovité páry} \quad [\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}]$$

$$i_{PŘ1,out} \dots \text{entalpie páry na výstupu z přehříváku 1} \quad [\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}]$$

$$S \dots \text{předpokládaná velikost výhřevné plochy PŘ2} \quad [\text{m}^2]$$

Součinitel přestupu tepla sáláním na straně spalín

$$\alpha_{sp,sal} = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{a_{st} + 1}{2} \cdot a_{sp} \cdot (t_{stř,sp} + 273,15)^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{t_z + 273,15}{t_{stř,sp} + 273,15}\right)^{3,6}}{1 - \frac{t_z + 273,15}{t_{stř,sp} + 273,15}} \quad (13.31)$$

$$\alpha_{sp,sal} = 5,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 0,124 \cdot (665 + 273,15)^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{467,57 + 273,15}{665 + 273,15}\right)^{3,6}}{1 - \frac{467,57 + 273,15}{665 + 273,15}}$$

$$\alpha_{sp,sal} = \mathbf{14,32\text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}}$$

Celkový součinitel přestupu tepla na straně spalín

$$\alpha_{sp} = \omega \cdot \alpha_{sp,k} + \alpha_{sp,sal} \quad (13.32)$$

$$\alpha_{sp} = 1 \cdot 105,14 + 14,32$$

$$\alpha_{sp} = \mathbf{119,46\text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}}$$

$\omega \dots$  součinitel omývání plochy

Součinitel prostupu tepla

$$k_{PŘ2} = \frac{\alpha_{sp}}{1 + \left(\varepsilon_z + \frac{1}{\alpha_p}\right) \cdot \alpha_{sp}} \quad (13.33)$$

$$k_{PŘ2} = \frac{119,46}{1 + \left(0,0053 + \frac{1}{2119,1}\right) \cdot 119,46}$$

$$k_{PŘ2} = \mathbf{70,71\text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}}$$

Střední logaritmický teplotní spád

$$\Delta t_{ln} = \frac{\Delta t' - \Delta t''}{\ln \frac{\Delta t'}{\Delta t''}} = \frac{(t_{sp,in} - t_p) - (t_{sp,out} - t_{PŘ1,out})}{\ln \frac{(t_{sp,in} - t_p)}{(t_{sp,out} - t_{PŘ1,out})}} \quad (13.34)$$

$$\Delta t_{ln} = \frac{(850 - 535) - (480 - 400)}{\ln \frac{(850 - 535)}{(480 - 400)}}$$

$$\Delta t_{ln} = \mathbf{171,47\ K}$$

Výkon PŘ2

$$Q_{PŘ2} = (M_p - M_v) \cdot (i_p - i_{PŘ1,out}) \quad (13.35)$$

$$Q_{PŘ2} = (7,1 - 0,36) \cdot (3471 - 3118,8)$$

$$Q_{PŘ2} = \mathbf{2375,4\ kW}$$

Velikost teplosměnné plochy

$$S_{PŘ2} = \frac{Q_{PŘ2}}{k_{PŘ2} \cdot \Delta t_{ln}} \cdot 1000 \quad (13.36)$$

$$S_{PŘ2} = \frac{2375,4}{70,71 \cdot 171,47} \cdot 1000$$

$$S_{PŘ2} = \mathbf{195,93\ m^2}$$

Délka jedné trubky

$$L = \frac{S_{PŘ2}}{n_{tr} \cdot \pi \cdot D} \quad (13.37)$$

$$L = \frac{195,93}{32 \cdot \pi \cdot 0,0318}$$

$$L = \mathbf{61,29\ m}$$

Počet řad

$$z_2 = \frac{L}{b} \cdot 2 \quad (13.38)$$

$$z_2 = \frac{61,29}{1,6} \cdot 2$$

$$z_2 = \mathbf{76,6 \Rightarrow 77}$$

Výška svazku PŘ2

$$H = (z_2 - 1) \cdot s_2 \quad (13.39)$$

$$H = (77 - 1) \cdot 0,05$$

$$H = \mathbf{3,8\ m}$$

### 13.3 Výpočet paralelní plochy

Plocha stěn

$$S_{st,PŘ2} = 2 \cdot (a + b) \cdot H \quad (13.40)$$

$$S_{st,PŘ2} = 2 \cdot (2,1 + 1,6) \cdot 3,8$$

$$S_{st,PŘ2} = \mathbf{28,12\ m^2}$$

Plocha závěsů

$$S_{z,PŘ2} = n_{tr} \cdot \pi \cdot D \cdot H \quad (13.41)$$

$$S_{z,PŘ2} = 32 \cdot \pi \cdot 0,0318 \cdot 3,8$$

$$S_{z,PŘ2} = \mathbf{12,15\ m^2}$$

Celková paralelní plocha

$$S_{p,PŘ2} = S_{st,PŘ2} + S_{z,PŘ2} \quad (13.42)$$

$$S_{p,PŘ2} = 28,12 + 12,15$$

$$S_{p,PŘ2} = \mathbf{40,27\ m^2}$$

Součinitel přestupu tepla paralelní plochy na straně spalín

$$\alpha_{sp,p} = 0,2 \cdot \alpha_{sp,k} + \alpha_{sp,sal} \quad (13.43)$$

$$\alpha_{sp,p} = 0,2 \cdot 105,14 + 14,32$$

$$\alpha_{sp,p} = \mathbf{35,35\ W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}}$$

Součinitel prostupu tepla paralelní plochy

$$k_{p,PŘ2} = \frac{\alpha_{sp,p}}{1 + (\varepsilon_{z,p} + \frac{1}{\alpha_p}) \cdot \alpha_{sp,p}} \quad (13.44)$$

$$k_{p,PŘ2} = \frac{35,35}{1 + (0,0045 + \frac{1}{2119,1}) \cdot 35,35}$$

$$k_{p,PŘ2} = \mathbf{30,1 \, W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}}$$

$$\varepsilon_{z,p} \dots \text{součinitel zanesení paralelní plochy} \quad [m^2 \cdot K \cdot W^{-1}]$$

Výkon paralelní plochy

$$Q_{p,PŘ2} = S_{p,PŘ2} \cdot k_{p,PŘ2} \cdot \Delta t_{ln} \quad (13.45)$$

$$Q_{p,PŘ2} = 40,27 \cdot 30,1 \cdot 171,47$$

$$Q_{p,PŘ2} = \mathbf{207,6 \, kW}$$

Celkový výkon PŘ2

$$Q_{c,PŘ2} = Q_{p,PŘ2} + Q_{PŘ2} \quad (13.46)$$

$$Q_{c,PŘ2} = 207,6 + 2375,4$$

$$Q_{c,PŘ2} = \mathbf{2583 \, kW}$$



Obrázek č. 13.1: Přejířák 2

## 14 Kontrolní přepočet výkonu navrženého kotle

Do výkonu kotle se započítává každá teplosměnná plocha, která se zúčastní přeměny napájecí vody na přehřátou páru. Podrobněji je toto schéma zobrazeno na obrázku č. 5.2. Pro přehlednost jsem sepsal všechny výkony do tabulky.

Tabulka č. 14.1: Výkony teplosměnných ploch kotle

Popis veličiny	Symbol	Hodnota	Jednotka
Spalovací komora	$Q_{SK}$	= 11231,54	[kPa]
Ohřívač vody	$Q_{EKO}$	= 2749,1	[kPa]
Přehřívák 1	$Q_{PŘ1}$	= 3684,6	[kPa]
Přehřívák 2	$Q_{PŘ2}$	= 2375,4	[kPa]
Celkový výkon kotle	$Q_{k,c}$	= 20040,64	[kPa]

Rozdíl výkonů

$$\frac{Q_k - Q_{k,c}}{Q_k} = \frac{20000 - 20040,64}{20000} = 0,2 \%$$

Vypočtený rozdíl mezi výkony má hodnotu 0,2 %, což je zanedbatelná hodnota. Výkon kotle podle zadání je tedy splněn.



## 15 Závěr

Ve své diplomové práci jsem se věnoval parnímu fluidnímu kotli. Abych mohl kotel navrhnout, vypočítat a následně vymodelovat, musel jsem nejdříve nastudovat problematiku fluidního spalování a parních kotlů obecně.

Nejprve jsem si zvolil palivo, které budu v kotli spalovat. Jedná se o černouhelnou energetickou směs pranou. Ve výpočtové části jsem provedl základní bilanční výpočty paliva, zjistil potřebné množství vzduchu a také množství spalín, které vzniknou po spálení zvoleného černého uhlí. Vytvořil jsem si program pro výpočet dílčích entalpií spalín a vzduchu. Výsledky jsem zaznamenal do tabulky, abych mohl následně promítnout získaná data do I-t diagramu.

Navrhnul jsem základní koncepci kotle a zpracoval ji do schématu, ve kterém jsem vyznačil všechny teplosměnné plochy. Následně jsem zvolil základní parametry kotle, abych mohl provést výpočet. Schéma vody a páry jsem také vypracoval pro větší názornost do přehledného barevného schématu.

Aby byla zajištěna dobrá fluidizace palivové směsi se spalovacím vzduchem proudícím z trysek v roštu na dně spalovací komory vyrobené z membránových stěn, určil jsem výšku prvního tahu na 24 m. O vyhoření paliva se budou starat dva plynové hořáky. Vypočítal jsem a také navrhnul výstup z ohniště vzhledem k množství spáleného paliva tak, aby mohly spaliny pohodlně opustit prostor prvního tahu a vstoupit do cyklonu.

Cyklonový odlučovač tuhých částic jsem navrhnul jako odstředivý s vnitřní vyzdívkou. Nachází se mezi prvním a druhým tahem. Popílek odloučený z něj putuje do fluidního uzávěru, přes který je veden buď přímo do spalovací komory, nebo přes jeho boční komory, kde předá část své energie zpět do ohniště. Teplosměnná plocha bočních komor, uvažovaných jako výparník, je při provozu připravena k okamžitému zapojení pro zvýšení výkonu kotle.

Ve druhém tahu jsem navrhnul membránové stěny přehříváku 1. V nich je vnořen výstupní konvekční přehřívák páry, zavěšený na chlazených závěsech. Uprostřed druhého tahu je ekonomizér, který jsem rozdělil na 3 části, aby bylo možné jej v budoucnu čistit nebo opravit. Poslední teplosměnnou plochou je trubkový ohřívák vzduchu vypočtený jako dvou obrátový. Na konci vystupují spaliny z kotle o teplotě 130 °C.

Všechny části kotle jsem navrhnul tak, aby bylo možné je reálně zkonstruovat. Volil jsem materiály, které jsou osvědčené, měli by tedy spolehlivě vydržet teploty a tlaky, které budou v kotli působit. V grafickém programu CAD jsem vytvořil model, následně provedl vizualizace všech součástí kotle. Ty jsem následně vložil do své práce.

Pára má na výstupu tlak o hodnotě 9,3 MPa a teplotě  $535 \pm 5$  °C. Vypočtený kotel se liší od zadaného výkonu o pouhé 0,2 %. Tato hodnota je zanedbatelná, proto považuji návrh kotle za úspěšný.

## **Poděkování**

Děkuji panu doc. Dr. Ing. Bohumíru Čechovi za spolupráci a jeho cenné rady při zpracování mé diplomové práce.

## Použitá literatura

- [1] ČERNÝ, V.: *Parní kotle a spalovací zařízení*. Praha: SNTL – Nakladatelství technické literatury, 1975.
- [2] KOLAT, P.: *Přenos tepla a hmoty*. Ostrava: Vysoká škola báňská, 1986.
- [3] DLOUHÝ, T.: *Výpočty kotlů a spalínových výměníků*. Vyd.3. V Praze: Nakladatelství ČVUT, 2007. ISBN 978-80-01-03757-7.
- [4] *Podklady a materiály katedry energetiky z měření fluidních kotlů*.
- [5] BUDAJ, F.: *Parní kotle: podklady pro tepelný výpočet*. Vyd. 4. přeprac. Brno: Vysoké učení technické, 1992.
- [6] JANEBA, B., KARTÁK, J.: *Tepelné výpočty kotlů a parních generátorů*. Praha: České vysoké učení technické, 1982.
- [7] RAYAPROLU, K.: *BOILERS for POWER and PROCESS*. USA: CRC Press Taylor & Francis Group, 2009. ISBN 978-4200-7537-3.
- [8] F-Chart Software: *EES – Engineering Equation Solver*. <<http://www.fchart.com>>.
- [9] HOLMGREN, M.: *X Steam – IAPWS IF97 Excel Steam Tables*.  
<<http://www.x-eng.com>>.
- [10] BALÁŠ, M.: *Kotle a výměníky tepla*. 1. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2009, ISBN 978-80-214-3955-9.
- [11] KADLEC, Z.: *Termomechanika: návody do cvičení*. 1. vyd. Ostrava: VŠB-TU, 2002. ISBN:978-80-248-1736-1.
- [12] LEINVEBER, J., VÁVRA P.: *Strojnické tabulky: pomocná učebnice pro školy technického zaměření*. 1. vyd. Úvaly: Albra, 2003, xv, 865 s. ISBN 80-86490-74-2.
- [13] BALÁŠ, M., LISÝ, M., MOSKALÍK, J.: *Kotle* [online]. [cit. 2017-05-15]. Dostupné z: <<http://vytapieni.tzb-info.cz/kotle-kamna-krby/8438-kotle-2-cast>>.

## Seznam obrázků

Obrázek č. 2.1: Parní fluidní kotel s cirkulující fluidní vrstvou.....	- 17 -
Obrázek č. 4.1: I-t diagram spalín pro černé uhlí.....	- 27 -
Obrázek č. 5.1: Schéma výhřevných ploch navrhovaného kotle .....	- 28 -
Obrázek č. 5.2: Schéma voda–pára .....	- 29 -
Obrázek č. 6.1 a 6.2: Spalovací komora.....	- 33 -
Obrázek č. 7.1: Cyklonový odlučovač popílku .....	- 34 -
Obrázek č. 8.1: Fluidní uzavěr – regulační výměník .....	- 35 -
Obrázek č. 10.1: Ohřívák vzduchu.....	- 44 -
Obrázek č. 10.2: Detail geometrie ohříváku vzduchu.....	- 44 -
Obrázek č. 11.1.: Ohřívák vody .....	- 50 -
Obrázek č. 12.1: Přehřívák 1 .....	- 52 -
Obrázek č. 13.1: Přehřívák 2 .....	- 63 -

## Seznam tabulek

Tabulka č. 4.1: Měrná entalpie některých složek spalín v závislosti na teplotě .....	- 25 -
Tabulka č. 4.2: Dopočtená tabulka spalín pro I-t diagram.....	- 26 -
Tabulka č. 14.1: Výkony teplosměnných ploch kotle.....	- 64 -

## Seznam příloh

CD-ROM

Výkresová dokumentace